

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En el diseño una estructura de pavimento es fundamental determinar las variables que intervienen, contar con procedimientos claros de diseño y emplear métodos analíticos que pronostiquen en forma adecuada la respuesta de la estructura a través de sus modelos matemáticos, para obtener espesores que cumplan la vida útil considerada y los estándares de calidad solicitados.

Investigaciones previas efectuadas por Leiva, Loria y Navas (2011), mencionan que las teorías de diseño de pavimentos involucran desde las metodologías de diseño empíricas, donde se correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ a través de observaciones y mediciones de campo, con las cargas del tránsito, condiciones ambientales, tipo de suelo, calidad de materiales, y proceso constructivo, hasta las metodologías de diseño de multicapa elástica, para las cuales el estado de esfuerzos y deformaciones de las capas de la estructura influyen en el comportamiento del pavimento, este tipo de análisis se ha facilitado con el desarrollo de programas computacionales.

Ciertas estructuras de pavimentos como las de aeropuertos, terminales de transporte terrestre, puertos marítimos e instalaciones militares deben tener un especial cuidado, ya que requieren parámetros específicos de diseño que no se encuentran en otros proyectos tradicionales. En el caso de una instalación militar la conformación física de los ejes del vehículo, el radio de aplicación de carga, el peso o carga que un solo eje aplica al pavimento puede fácilmente exceder el valor del eje normalizado de la metodología AASHTO (1993) el cual es de 8.2 toneladas. Las frecuencias del tránsito en una instalación militar son normalmente bajas, pero el daño que causan al pavimento es alto y requieren un estudio particular.

Este documento presenta esas consideraciones, comparando los resultados del método de diseño tradicional como es el AASHTO (1993), método de diseño para cargas pesadas Manual MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads” y software PCASE para diseño de pavimentos de aeropuertos y carreteras, al ser utilizados

en el diseño de pavimento de una instalación militar. Este trabajo se orientará en realizar el dimensionamiento, para este tipo de pavimentos y se analizará los resultados obtenidos por los métodos considerados y se elegirá la alternativa más adecuada.

1.2. Justificación

Frente a los avances en las metodologías de diseño de las estructuras de pavimentos se observa la especialización y particularización de los procedimientos para el diseño de estructuras no convencionales que requieren un estudio de las variables específicas que intervienen en el diseño. En este sentido se considera el caso particular del diseño de los pavimentos flexibles para instalaciones militares. A partir del hecho que no existe procedimientos particulares en el diseño de estructuras de pavimentos para instalaciones militares, las metodologías de diseño general de pavimentos flexibles entre la que se destacan, es el método AASHTO.

El cual se requiere en nuestro medio el desarrollo de nuevos procedimientos particulares que permitan documentar el diseño, construcción y comportamiento de las estructuras de pavimentos que podrían considerarse poco convencionales, en donde algunas de sus variables deban caracterizarse en forma particular, como en el caso de los pavimentos para instalaciones militares, por las condiciones especiales que estas presenten como son la variable tránsito.

Los beneficios que se podrían obtener con el desarrollar un documento sobre un estudio de caso es contar con un ejemplo de aplicación específico para este tipo de diseño de estructuras de pavimento que sirva como guía en el diseño de este tipo de estructuras.

De igual manera se debe mencionar que algunas variables que participan en el diseño no han sido caracterizadas en forma específica, siendo este uno de los objetivos específicos a alcanzar a través del desarrollo del presente trabajo.

El desarrollo de este documento considerado como un estudio de caso, presentará diseños de pavimentos flexibles con vehículos militares existentes en el ejército de Bolivia, tomando como muestra el “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, el cual se documentará el procedimiento de diseño para instalaciones militares del ejército y se presenta la comparación de diversos métodos de diseño como es el AASHTO (1993), método de

diseño para cargas pesadas Manual MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads” y software PCASE para diseño de pavimentos de aeropuertos y carreteras el cual considera vehículos militares.

1.3. Situación problemática

Como se conoce en la actualidad, en Bolivia utilizan diversas metodologías y manuales que se han desarrollado por entidades nacionales e internacionales, pero no se cuenta con un procedimiento ni estudios de casos en los cuales se diseñe estructuras de pavimentos flexibles para instalaciones militares por otro lado, según los antecedentes, en nuestro país no existe evidencia de diseños para instalaciones militares del ejército.

Es por tal motivo que se ve necesario hacer una experimentación sobre el diseño de estructuras de pavimentos flexibles en instalaciones militares, por la necesidad que surge dentro de algunos aspectos se puede señalar la falta de manuales, metodologías y estudios de casos en los cuales se diseña estructuras de pavimentos flexibles para este tipo de instalaciones.

Estos procedimientos de cálculo para diseño, se han clasificado de acuerdo a diversos parámetros como por ejemplo el tipo de material, ubicación rural o urbana, espesor, por la función que desempeñan, por las cargas que soportan, y por la forma como se distribuyen las cargas.

Otro aspecto de los procedimientos para diseñar, desarrollado a través del tiempo es el cálculo de pavimentos en función del nivel de tránsito, las frecuencias del tránsito en una instalación militar son normalmente bajas, pero el daño que causan al pavimento es alto y requieren un estudio particular, por otro lado, existen metodologías y procedimientos para el diseño de pavimentos de usos específicos como aeropuertos, puertos, zonas de carga, depósitos y muchos otros, que pretenden una mejor caracterización de las variables que intervienen en el diseño de la estructura de pavimento.

En este trabajo se considera el caso particular de diseño de pavimentos flexibles para instalaciones militares del ejército, los procedimientos y métodos de diseño existentes para este tipo de estructuras que no son de amplio conocimiento y el diseño de éstas en nuestro medio se desarrollan con metodologías tradicionales como es el AASHTO (1993). Por lo

cual se ve necesario realizar el diseño de espesores de pavimentos asfálticos para vehículos militares usados típicamente en instalaciones militares del ejército nacional, como muestra el “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, por ser estos poco convencionales.

1.3.1. Problema

¿Qué análisis tendrá, al dimensionar de acuerdo a los procedimientos y métodos de diseño empleados para el diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares del ejército?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar el dimensionamiento del pavimento flexible de la instalación militar del ejército “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, de acuerdo a los procedimientos y métodos de diseño empleados tradicionalmente para el diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares del ejército AASHTO (1993), manual de diseño de cargas pesadas y métodos especializados para el diseño de este tipo de pavimentos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Recopilar información sobre las metodologías relacionadas con el diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares del ejército utilizados en la actualidad.
- Realizar la caracterización de los materiales, componentes del pavimento.
- Efectuar diseños de pavimento flexible para instalaciones militares del ejército y demostrar que las diferencias encontradas entre los modelos tradicionales AASHTO (1993), método de diseño de pavimentos para cargas pesadas Manual MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads” y el software Pavimento-Transporte Ingeniería estructural asistida por computadora PCASE, son considerables y deben de ser tenidas en cuenta en el momento de realizar este tipo de diseño de pavimento.
- Identificar cuál de las metodologías se ajustan mejor a la realidad del diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares del ejército.
- Realizar el diseño de pavimento flexible considerando el diseño para transportadores de vehículos militares a orugas, (LOWBOY).

1.5. Hipótesis

A partir del análisis y conocimientos adecuados de los procedimientos y métodos de diseño empleados para pavimentos flexibles en instalaciones militares del ejército específicamente, permitirá realizar el diseño y construcción adecuado para vehículos blindados militares.

1.6. Identificación de variables

1.6.1. Definición de variables

Variable independiente

- Procedimientos y métodos de diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares del ejército.

Variable dependiente

- El diseño y construcción adecuado para vehículos blindados militares.

1.6.2. Operacionalización de variables

Tabla 1. Variable Independiente

Variable Independiente	Concepto	Indicador	Unidad
Procedimientos y métodos de diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares.	Se realizará el dimensionamiento para el diseño de pavimentos flexibles en instalaciones militares que permitirá realizar diseños ajustados a las condiciones particulares de funcionamiento al poder caracterizar de manera más exacta las variables que se involucran en el mismo	Espesor del paquete estructural	cm
		Magnitud de la carga peso	Tn
		Ejes equivalentes	Tn/ejes

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Variable Dependiente

Variable Dependiente:	Sub variables	Concepto	Indicador	Unidad
El diseño y construcción adecuado para vehículos blindados militares	Tipos de materiales	Los cuales se deben muestrear, probar y evaluar para cumplir con los requisitos de calidad necesarios	CBR	%
	Tipo de subrasante	La cual es la base para el diseño del espesor de la estructura del pavimento flexible y se debe el valor del módulo elástico	Espesor del pavimento	cm
	Características del vehículo y neumático	El cual se debe conocer las características como peso bruto, distribución por ejes, datos de neumáticos configuraciones típicas de carga, presión de contacto.	Peso bruto vehículo	Lb
			Carga de neumáticos	%
			Presión de neumáticos	Psi

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

El siguiente trabajo corresponde a un tipo de investigación aplicada, el cual este caso el objeto, es encontrar estrategias que puedan ser empleadas para el abordaje de un problema en específico. La investigación se nutre de la teoría para generar conocimientos prácticos. A través de esta investigación se puede medir ciertas variables para pronosticar comportamientos, que nos serian útiles para nuestro estudio.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1. Unidad de estudio

La unidad de estudio es el dimensionamiento de pavimento flexible.

1.8.2. Población

Estará constituida por todos los militares del servicio activo como pasivo, que se encuentran en la ciudad de Tarija.

1.8.3. Muestra

Personal de la instalación militar del BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”.

1.8.4. Muestreo

Son el personal militar pasivo y activo y los vehículos blindados que se encuentra el “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, y en las demás instalaciones del ejército de Bolivia constituidos por:

Tabla 3. Vehículos militares blindados en Bolivia

Vehículos militares del ejército de Bolivia
EE-09 CASCABEL
EE-11 URUTU
M-113
SK-105 KURASSIER
MOWAG ROLAND
V-100 (M706)
M-998 HMMWV HUMVEE
SAURER 4K-4FA
M35A2
DONGFENG EQ240/EQ2081
FAW Jiefang CA1122J

Fuente: Elaboración propia

Se considera el diseño de un vehículo militar, el de mayor frecuencia o el de mayor carga en él, “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, en este caso se ha tomado, el vehículo militar tipo FAW Jiefang CA1122J, que es un vehículo militar tipo de uso para transporte de personal.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

Para la información de los vehículos militares se realizó entrevista al Cnl. DAEN Miguel Montenegro Calvimontes especialista en vehículos militares blindados del servicio pasivo, donde se tomó en cuenta las siguientes preguntas:

1.- ¿En qué vehículo blindado se especializó Ud.?

Tuve la oportunidad de formarme como especialista en blindados desde el grado de Subteniente, Comandando un Escuadrón de Reconocimiento Mecanizado con los vehículos de Transporte de Personal M-113 llegando a desempeñarme en el grado de Mayor como Segundo Comandante de una Unidad Blindada durante el lapso de 3 años consecutivos, habiéndome especializado en todos los vehículos blindados de nuestro Ejército; junto con el personal de blindadistas, se dictaron en ese lapso, dos cursos completos por año, habiendo realizado un total de seis cursos con personal profesional del Ejército, desde el grado de Subtenientes hasta el grado de Capitán; los cursos concluían con juegos de guerra con los vehículos blindados.

2.- ¿Dentro de la Unidad que Ud. trabajó con blindados, existen jardines de obstáculos para blindados?

Los cursos de especialidad para blindados se dividen en varias partes que abarcan cursos de táctica, cursos de capacitación del material, abarcando sus características, armamento, ejercicios de mantenimiento y conducción de los vehículos, este último tipo de capacitación concluye cabalmente el cruzado de jardines de obstáculos de diferentes tipos y materiales tanto en tierra como en agua, pues todos son anfibios. Los jardines en tierra tienen pendientes frontales y laterales de hasta 45 grados, y giros laterales de 360 grados. En el agua se realiza el ingreso y salida del agua con su respectiva navegación, teniendo otra variante, dependiendo del tipo de vehículo, que se hace con y sin personal, particularmente los M-113 que son de transporte de personal, con una escuadra de

hombres, es decir, 9 combatientes, que desembarcan con el vehículo detenido como con el vehículo en marcha, mientras que los vehículos que no son de transporte de personal, solo tienen su tripulación, consistente en un Comandante de carro, un Conductor y un Tirador; esta tripulación es capacitada para intercambiar sus puestos en cualquier momento. Todos los carros pueden ingresar al agua con las escotillas abiertas o cerradas; ninguno requiere deslizarse sobre el fondo de tierra, pues flotan en el agua; para el caso de que hayan ingresado al agua con las escotillas cerradas se disponen de periscopios para que la tripulación pueda ver a través de ellos; para el caso de que hayan ingresado al agua con las escotillas abiertas, disponen de bombas de sentina para evacuar el agua que haya ingresado, en pocos segundos.

3.- ¿Cuánta movilidad tienen los vehículos blindados y cuál su velocidad?

Me imagino que lo que desea saber es la autonomía de los vehículos. Se denomina AUTONOMÍA, a la distancia que recorre un vehículo con un solo tanque de combustible, pero, esta distancia consiste en ida y vuelta o, dicho de otra manera, ir a cumplir una misión y retornar a su punto de partida sin recargar. Esta movilidad depende del tipo de vehículo, por ejemplo, el M-113 que estamos tomando como ejemplo, tiene una autonomía de 450 Km. con un tanque lleno y sin recargar.

En cuanto a velocidad de los vehículos, en carretera alcanzan los 65 Km/H, mientras que a campo traviesa llegan a los 55Km/H.

4.- ¿Los vehículos a oruga disponen de algún dispositivo o accesorio para proteger el pavimento?

Si, disponen de tacos de goma que se colocan dentro de las partes internas de las orugas y tienen la altura de la parte externa de las mismas para que se puedan desplazar sin destrozar el pavimento; sin embargo, debo hacer notar que los desplazamientos en carreteras pavimentadas son de corta duración, limitándose a desplazamiento administrativos internos y que no deben sobrepasar los 10 Km., es decir son movimientos que se realizan dentro de sus propias instalaciones; para desplazamientos administrativos fuera de sus instalaciones los montan en sus transportadores, que son trailers orgánicos de las mismas unidades blindadas.

Hay movimientos que se realizan fuera de sus instalaciones y son un verdadero problema por ser caros y son los movimientos que a los Capitanes Generales (Presidentes de la República) les encanta: son los desfiles de los blindados ante la población, donde los tacos de goma se acaban y hay que comprarlos en las fábricas de los blindados que quedan en el exterior; cada vehículo requiere de 80 tacos (40 en cada oruga).

1.10. Alcance

Esta investigación busca analizar el dimensionamiento que permita documentar el diseño y el comportamiento del pavimento flexible en una instalación militar del ejército de acuerdo a las condiciones especiales que presenta, haciendo hincapié a la instalación militar del ejército BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, el cual con la información recopilada se selecciona tres procedimientos de diseño de pavimentos flexibles, los cuales emplean materiales que cumplan con las especificaciones y normatividad boliviana (características de los materiales, ensayos en laboratorios), los métodos seleccionados son: El modelo de diseño empírico más usado en el país que es el AASHTO, (1993), el manual MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads” desarrollado por el Instituto del Asfalto para el diseño de pavimentos flexibles con cargas pesadas, el cual emplea la teoría multicapa elástica con sus propias ecuaciones de transferencia para el cálculo del espesor y el software Pavimento-Transporte Ingeniería estructural asistida por computadora PCASE desarrollado por Transportation Systems Center & Engineering Research and Development Center of US Army Corps Engineers en el año 2010, el cual -adopta un modelo multicapa elástico y tiene la condición especial de poder caracterizar la variable tránsito con vehículos militares. A si mismo realizaremos el diseño para un hipotético caso que los vehículos militares blindados de La paz, lleguen al BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ, para alguna actividad militar correspondiente. Todo este proceso el cual realizaremos nos ayudara a solucionar y mejorar las condiciones, necesidades y requerimientos que se presenten a sí mismo como las respectivas conclusiones y recomendaciones para el presente estudio.

CAPÍTULO II
ASPECTOS GENERALES SOBRE
DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES EN INSTALACIONES
MILITARES.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN INSTALACIONES MILITARES.

Se enfoca a dos aspectos relevantes para el desarrollo del presente trabajo, el primero es la información referente a instalaciones militares su clasificación, definiciones y cantidad existentes en Bolivia y lo segundo referido a los métodos de diseño de pavimentos flexibles.

2.1. Instalaciones militares en Bolivia.

Las Fuerzas Armadas del Estado Plurinacional de Bolivia, son el conjunto de instituciones castrenses encargadas de la defensa nacional de Bolivia y están constituidas por el Comando en Jefe, el Ejército de Bolivia, la Fuerza Aérea Boliviana y la Armada de Bolivia. Dichas instituciones dependen del ministerio de defensa en lo administrativo de este país, como se presentan en las siguientes tablas (3-7).

Adicionalmente, además de las tres fuerzas ya mencionadas, la Policía Nacional de Bolivia, aunque dependiente del ministerio de gobierno en tiempos de paz, forma parte de las reservas de las Fuerzas Armadas según la Ley Orgánica de las Fuerzas Armadas de esta nación, junto con otros cuerpos de reserva como: el personal jubilado, los oficiales y excadetes del liceo militar, el personal de egresados con grado de la universidad militar castrense y SAR-FAB de emergencia y salvamento. (Ejército de Bolivia).

De acuerdo a la constitución política del estado de acuerdo a los art. 243°-250° las fuerzas armadas tienen como misión de:

Art. 243° Las fuerzas armadas del estado están orgánicamente constituidas por el Comando en Jefe, el Ejército de Bolivia, la Fuerza Aérea y la Armada de Bolivia, cuyos efectivos serán fijados por la Asamblea Legislativa Plurinacional a propuesta del Órgano ejecutivo.

Art. 244° Las Fuerzas Armadas tienen por misión fundamental defender y conservar la independencia, seguridad y estabilidad del Estado, su honor y la soberanía del país;

asegurar el imperio de la constitución, garantizar la estabilidad del Gobierno legalmente constituido, y participar en el desarrollo integral del país.

Art. 245° La organización de las Fuerzas Armadas descansa en su jerarquía y disciplina. Es esencialmente obediente, no delibera y está sujeta a las leyes y a los reglamentos militares. Como organismo institucional no realiza acción política; individualmente, sus miembros gozan y ejercen los derechos de ciudadanía en las condiciones establecidas por la ley.

Art. 246° I. Las Fuerzas Armadas dependen de la presidenta o presidente del estado y reciben sus órdenes, en lo administrativos, por intermedio de la Ministra o del Ministro de Defensa y en lo técnico, del Comandante en Jefe.

II. En caso de guerra, el Comandante en Jefe de las Fuerzas Armadas dirigirá las operaciones.

Art. 247° I. Ninguna extranjera ni ningún extranjero ejercerá mando ni empleo o cargo administrativo en las Fuerzas Armadas sin previa autorización del Capitán General.

II. Para desempeñar los cargos de Comandante en Jefe de las Fuerzas Armadas, Jefe del Estado Mayor General, Comandantes y Jefes de Estado Mayor del Ejército, Fuerzas Aérea, Armada Boliviana y de grandes unidades, será indispensable ser boliviana o boliviano por nacimiento y reunir los requisitos que señale la ley. Iguales condiciones serán necesarias para ser Viceministra o Viceministro del Ministerio de Defensa.

Art. 248° El Consejo Supremo de Defensa del Estado Plurinacional, cuya composición, organización y atribuciones determinará la ley, estará presidido por el Capitán General de las Fuerzas Armadas.

Art. 249° Todo boliviano estará obligado a prestar servicio militar, de acuerdo con la ley.

Art. 250° Los ascensos en las Fuerzas Armadas serán otorgados conforme con la ley respectiva.

Se relaciona a continuación las definiciones más relevantes asociadas a las instalaciones militares:

- La unidad militar es un elemento de organización permanente dentro de unas Fuerzas Armadas; bajo el mando de un jefe; con capacidades y características diferenciadas; y cuya estructura, efectivos y material han sido determinados por la autoridad competente.
- División: Una división es una gran unidad militar formada por varias brigadas o regimientos, a los que se añaden unidades más pequeñas de artillería, Estado Mayor y otras unidades especializadas (comunicaciones, ingenieros, etc.), generalmente sumando un total de entre 8.000, y un máximo de 10.000 soldados.
- Una brigada es una unidad militar compuesta por dos o más regimientos o batallones y otras unidades menores que puede unirse a otras brigadas formando una división. Están formadas por unos 3.000 o 5.000 soldados
- Un batallón es una unidad militar de alrededor de 1.000 hombres (puede ir de 300 a 1.500) formada, usualmente, por dos a seis compañías y mandada típicamente por un Mayor o, si son varios batallones, por un teniente coronel.

Tabla 4. Regiones militares en Bolivia

Región Militar	Sede de Comando	Unidades
I	La Paz	Conformado por 17 unidades
II	Oruro	Conformado por 9 unidades
III	Potosí	Conformado por 2 unidades
IV	Cochabamba	Conformado por 4 unidades
V	Beni	Conformado por 3 unidades
VI	Santa Cruz	Conformado por 10 unidades

Fuente: Ejercito de Bolivia

Tabla 5. Divisiones militares en Bolivia

División	Sede de Comando	Unidades
I	Cobija	Unidades que la componen son 2 regimientos y 2 batallones
II	Oruro	Unidades que la componen son 5 regimientos y 3 batallones
III	Villa Montes	Unidades que la componen son 4 regimientos y 1 batallón
IV	Camiri	Unidades que la componen son 4 regimientos
V	Roboré	Unidades que la componen son 5 regimientos y 1 batallón
VI	Trinidad	Unidades que la componen son 7 regimientos
VII	Cochabamba	Unidades que la componen son 4 regimientos y 1 batallón
VIII	Santa Cruz	Unidades que la componen son 7 regimientos y 3 batallones
IX	Villa Tunari	Unidades que la componen son 4 regimientos
X	Tupiza	Unidades que la componen son 6 regimientos y 1 batallón

Fuente: Ejercito de Bolivia

Tabla 6. Distrito Naval en Bolivia

Distrito Naval	Sede de Comando	Unidades
I	Beni	Conformado por 1 unidad
II	Memoré	Conformado por 1 unidad
III	Madera	Conformado por 1 unidad
IV	Titicaca	Conformado por 2 unidades
V	Santa Cruz	Conformado por 1 unidad
VI	Pando	Conformado por 1 unidad

Fuente: Ejercito de Bolivia

Tabla 7. Policía militar naval de Bolivia

Policía Naval	Sede de Comando	Unidades
A.N.4	La Paz	Conformado por 1 Batallón
A.N.1	Cochabamba	Conformado por 1 Batallón
A.N.2	Santa Cruz	Conformado por 1 Batallón
IV Distrito	Titicaca	Conformado por 1 Batallón
V Distrito	Yacuiba	Conformado por 1 Batallón

Fuente: Ejercito de Bolivia

Tabla 8. Unidades especiales del ejército de Bolivia

Unidades especiales del ejército de Bolivia	Unidades
Comando de fuerzas especiales	Conformado por 6 Comandos
Unidades directamente dependientes del CGE	Conformado por 8 Unidades
Comando de aviación del ejercito	Conformado por 2 comandos
Unidades especiales de la armada boliviana	Unidades
Unidad especial	Conformado por 5 Unidades
Otras unidades de la fuerza aérea boliviana	Unidades
Unidades aéreas	Conformado por 4 Unidades
Institutos aéreos militares	Conformado por 6 institutos

Fuente: Ejercito de Bolivia

2.2. Pavimento

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

2.2.1. Características que debe reunir un pavimento

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. (Fonseca, A, 2006).

2.3. Pavimentos flexibles

Este tipo se caracteriza por estar conformado en la superficie por una capa de material bituminoso o mezcla asfáltica que se apoya sobre capas de material granular, las cuales generalmente van disminuyendo su calidad conforme se acercan más a la subrasante. Esto se debe a que los esfuerzos que se producen por el tránsito van disminuyendo con la profundidad y por razones económicas. La teoría que se utiliza para analizar su comportamiento es la teoría de capas de Burmister (Huang, Y, 2004).

2.3.1. Análisis y diseño de pavimentos

En el diseño de pavimentos, se ha buscado herramientas analíticas lo suficientemente efectivas para ayudar en el análisis de las estructuras de pavimento con el fin de procurar que los diseños estén basados en el desempeño, capaz de extender la vida útil de los pavimentos. Una herramienta ideal de diseño consiste en un modelo estructural capaz de predecir el estado de esfuerzos y deformaciones dentro de la estructura de pavimento bajo la acción del tráfico y las condiciones ambientales.

Existen tres categorías en las que se pueden clasificar los métodos de dimensionamiento:

- **Métodos Empíricos.**- Estos métodos están basados en resultados de experiencias prácticas y ensayos de los cuales se deducen fórmulas, las cuales son calibradas posteriormente en base a la evaluación de resultados, requiere de muchas observaciones para establecer conexiones entre variables de diseño y su funcionamiento, además, no es necesario establecer bases científicas de conexiones observadas en los experimentos, se traduce en catálogos, ábacos y tablas que se revisan con cierta periodicidad.
- **Métodos Analíticos.** - La respuesta del pavimento se conoce, en forma de tensiones o deformaciones, a través de modelos matemáticos, que se relaciona con el comportamiento de la estructura y su deterioro gracias a datos empíricos.

A continuación, se presenta una clasificación de los métodos analíticos:

Tabla 9. Clasificación de los métodos analíticos

Métodos analíticos	Modelos de Respuesta	Según Modelo	Multicapa
			Elementos finitos
			Elementos Discretos
		Según Ecuaciones Constructivas	Elásticos
	Visco-elásticos		
	Modelos de Deterioro	De regresión	
		Probabilísticos	
		Leyes de Fatiga	
Acumulación de Deformaciones			

Fuente: Estudio comparado de los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes y su evolución. Universidad de Sevilla, 2015

- **Métodos Empírico -Mecánicos.** - Combina conocimientos de dos tipos, mecanicistas para evaluar el comportamiento mecánico de un pavimento, es decir, se genera un modelo de carga, donde es posible conocer las respuestas críticas del pavimento, así como su deterioro y empíricos relacionando las respuestas del pavimento con su funcionamiento. (Mena- Bernal, 2015).

Algunos métodos de diseño mecanicista-empírico son:

- Método Shell (1977)
- Instituto del Asfalto (1982)
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 1992)
- Diseño Mecanicista-Empírico Surafricano (1992)
- Método de Diseño AASHTO-MEPDG

El presente trabajo revisará el modelo de diseño empírico más usado en el país que es el AASHTO, (1993), también el manual MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads” desarrollado por el Instituto del Asfalto para el diseño de pavimentos flexibles con cargas pesadas, el cual emplea la teoría multicapa elástica con sus propias ecuaciones de transferencia para el cálculo del espesor y se revisará el software

Pavimento-Transporte Ingeniería estructural asistida por computadora PCASE desarrollado por Transportation Systems Center & Engineering Research and Development Center of US Army Corps Engineers en el año 2010, el cual adopta un modelo multicapa elástico y tiene la condición especial de poder caracterizar la variable tránsito con vehículos militares.

2.4. Guía de diseño AASHTO 93

La prueba de carretera AASHO realizada cerca de Ottawa, Illinois, durante el período 1958-1962 fue el mayor experimento de campo en simulación de tráfico, y se convirtió en la base para las guías de diseño utilizadas en América del Norte, dicha prueba se realizó para un tráfico de 1'000.000 de repeticiones y con base a los resultados obtenidos se interpolaron las ecuaciones y las recomendaciones que crearon esta guía.

Uno de los métodos de diseño más utilizados en Bolivia para el diseño de pavimentos flexibles es el método de la AASHTO, el cual describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras.

En el caso de los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodamiento se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito (mayores de 50,000 ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton durante el período de diseño), dejando fuera pavimentos ligeros para tránsitos menores al citado, como son los caminos revestidos o de terracería.

En el período 1984-1985 el Subcomité de Diseño de Pavimentos junto con un grupo de Ingenieros Consultores comenzó a revisar el "Procedimiento Provisional para el Diseño de Pavimentos AASHTO-72", y a finales del año 1986 concluye su trabajo con la publicación del nuevo "Manual de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO '86", y sigue una nueva revisión en el año 1993, por lo cual, hoy en día, el método se conoce como Método AASHTO-93, los procedimientos involucrados en el método de diseño, versión 1993, están basados en las ecuaciones originales de la AASHO que datan de 1961, producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos.

La versión de 1986 y la actual de 1993 se modificaron para incluir factores y parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por ese organismo entre el método original y la versión del año 1993 donde surgió la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO con el concepto del proceso de diseño de sobrecapas, posteriormente en el año 1998 se presenta el suplemento para la guía presentada en el 1993 que estaba enfocada en el diseño de pavimentos rígidos. En esta etapa de la Guía de Diseño AASHTO se comenzó con los principios del método mecanicista y en el año 2002 se publica la Guía de Diseño Mecanicista Empírica, mejor conocida como Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), Guía Mecanicista Empírica para Diseño de Pavimentos, por su traducción del inglés.

El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general Aashto-93, que toma la siguiente forma:

$$\text{Log}W_{18} = Z_R * S_o + 9,36 * \text{Log}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta\text{PSI})}{4,2 - 1,5}}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}M_R - 8,07$$

El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, “W18”.

El parámetro de confiabilidad, “R”.

La desviación estándar global, “So”.

El módulo de resiliencia efectivo, “M_R” del material usado para la subrasante.

La pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y finales deseados, “ΔPSI”.

Numero estructural,” SN”.

2.5. Método de diseño-Manual MS-23 del Instituto del Asfalto.

Este método fue desarrollado por el Asphalt Institute, y se presenta en el Manual MS-23, denominado “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads”, los procedimientos presentados en este documento están basados en la aplicación de la teoría elástica utilizada en el diseño de pavimentos la cual se utiliza en investigaciones en la actualidad.

Este método se emplea en el diseño de espesores de pavimentos asfálticos para vehículos pesados, tales como camiones de transporte de troncos, transportadores de volquete, carretillas elevadoras de horquilla, montacargas de horquilla, montacargas con neumáticos de goma y muchos otros vehículos especiales que tienen tan solo de cuatro a doce o más llantas. Algunos de estos vehículos tienen masas brutas (pesos) superiores a 180.000 kilogramos (400.000 lb). Muchos tienen cargas de ruedas y características de espaciamiento de las ruedas que no permiten el uso de métodos de diseño de espesor estándar.

El método presentado en este manual no está destinado a cargas o aeropuertos convencionales. El diseño de espesor de los pavimentos de asfalto para estas aplicaciones se incluye en los siguientes manuales del Instituto de Asfalto:

- Diseño de espesores: pavimentos de asfalto para autopistas y calles (MS-1)
- Pavimentos de asfalto a profundidad completa para aeropuertos de aerolínea (MS-11)

El método presentado en este manual está destinado a utilizarse en el diseño de pavimentos de asfalto para vehículos no incluidos en MS-1 o MS-11, el cual sería el caso de vehículos existentes en las instalaciones militares.

Los criterios de diseño, en términos de los valores máximos permisibles, se han establecido y se utilizan como base para seleccionar el espesor adecuado, TA, de un pavimento de asfalto de profundidad total o completa.

Los pavimentos de asfalto de profundidad total son adecuados para vehículos pesados. Un pavimento de asfalto de profundidad completa es aquel en el que se emplean mezclas de asfalto sobre la subrasante natural o mejorada.

2.5.1. Principios Básicos

El procedimiento se basa en el concepto de que el diseño del pavimento para vehículos con ruedas múltiples se puede lograr calculando primero una carga de rueda única "equivalente". La carga equivalente de una sola rueda se usa para seleccionar el espesor del pavimento.

El espesor del pavimento variará con las presiones de contacto del suelo con la llanta del vehículo, la magnitud de la carga y el espaciado de las llantas cargadas.

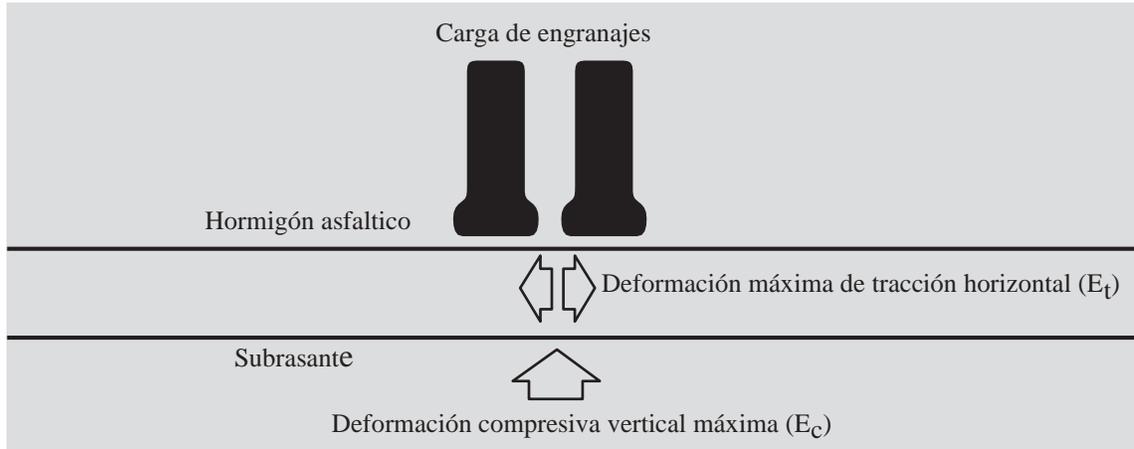
Además de las características del vehículo y la carga, el grosor del diseño del pavimento de asfalto dependerá de la resistencia de la subrasante y de la temperatura media anual del aire.

2.5.2. Criterios de diseño

El procedimiento de diseño se basa en los conceptos de diseño elástico multicapa utilizados en el desarrollo de los manuales del Asphalt Institute, MS-1 y MS-11. Este enfoque supone que la aplicación de una carga al pavimento produce dos tensiones elásticas críticas.

Son tensión de tracción horizontal, E_t , en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico, y la deformación por compresión vertical, E_c , en la parte superior de la capa de subrasante como se ilustra en la figura 1.

Figura 1. Ubicación y dirección de las deformaciones de tracción y compresión



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

En este procedimiento, el análisis de diseño básico se da en términos de una sola rueda carga de alguna magnitud, P , y presión de contacto suelo-neumático, p . Sin embargo, muchos vehículos tienen varias ruedas ubicadas lo suficientemente cerca una de la otra para que se tenga en cuenta la influencia de las cargas combinadas. Esto se hace calculando una carga de rueda única equivalente para representar la condición de rueda múltiple. La influencia combinada de las ruedas adyacentes se determina mediante el uso de factores de deflexión de la interfaz. Las deflexiones se calculan en la superficie de la subrasante, bajo la carga de la rueda múltiple, y se determina una carga de rueda individual equivalente que producirá una deflexión igual. La carga de una rueda equivalente se usa luego para diseñar el pavimento.

Si un problema de diseño puede tratarse como una sola rueda depende del espaciado entre ruedas del vehículo de diseño. Si las ruedas están separadas por una distancia mayor que ocho veces el radio del área cargada circular, determinada como se describió anteriormente, el problema puede tratarse como un problema de diseño de una sola rueda. Sin embargo, si la distancia entre las ruedas es menos de ocho veces el radio de carga, el problema debe tratarse como un problema de carga de rueda doble. El método de diseño aumenta en complejidad de cargas de una sola rueda, a través de cargas de doble rueda. Por lo tanto, es posible ahorrar un tiempo considerable para llegar a una solución al

determinar si un problema aparente de carga de ruedas dobles puede tratarse como un problema de carga de una sola rueda. En problemas de ruedas duales, el diseño T_A está determinado por una carga de rueda individual equivalente calculada en el punto de deflexión máxima de la subrasante. Para las ruedas duales, este punto ocurre a mitad de camino entre los dos neumáticos.

El procedimiento completo para calcular las tensiones y las tensiones dentro de los sistemas elásticos multicapa para un análisis de diseño es complicado. Se requiere una gran cantidad de soluciones informáticas debido a la variedad de cargas y rangos modulares de concreto asfáltico y suelo de subrasante. Además, las ubicaciones horizontales de las deformaciones máximas bajo cargas de ruedas múltiples varían con las dimensiones del espaciado de carga, la magnitud de las cargas, el espesor del pavimento y las relaciones modulares de las capas de pavimento. El procedimiento de diseño descrito en este estudio, considera todos los elementos anteriores.

Las tensiones no se calculan directamente en este método de diseño, estas se calculan a través de nomogramas elaborados exhaustivamente por investigaciones y comprobaciones de correlación, lográndose el mismo objetivo indirectamente de contar con estas tensiones para calcular los daños. Además, se cuenta con varias suposiciones simplificadoras para reducir la complejidad del procedimiento de diseño.

Los criterios de diseño, en términos de los valores máximos permisibles para ambas tensiones críticas, se han establecido y se utilizan como base para seleccionar el espesor adecuado, T_A (Thickness asphalt) de un pavimento de asfalto de profundidad completa. El módulo dinámico E^* o la relación entre el esfuerzo y la deformación, del concreto asfáltico depende de la temperatura, por lo que el período del año para el mayor daño potencial al pavimento varía con las condiciones de temperatura propias de cada ubicación geográfica. La deformación vertical por compresión en la subrasante, un indicador de deformación permanente en la subrasante, es mayor cuando el módulo de concreto asfáltico es bajo (la temperatura del pavimento es alta). Por el contrario, cuando el concreto asfáltico tiene un alto valor de módulo (en condiciones de frío), las tensiones de tracción horizontales en la parte inferior de la capa unida al asfalto pueden ser críticas, especialmente en aplicaciones de carga repetida.

El número de repeticiones de deformación es relativamente pequeño para las situaciones de diseño típicas de las instalaciones militares comparados con los diseños para carreteras, los cuales son diseñados para deformaciones horizontales extensibles, siendo generalmente más delgados que los requeridos por los criterios de deformación por compresión vertical. Por esta razón, y para reducir la complejidad del procedimiento de diseño, se utiliza el criterio de deformación vertical de subrasante en el desarrollo del método de diseño propuesto para este estudio. (Instituto de Asfalto, manual, MS-23).

2.5.3. Variables de diseño

2.5.3.1. Tipo de material para pavimentos en instalaciones militares

Se proponen los pavimentos de asfalto de profundidad total, para las vías en instalaciones militares, ya que han demostrado ser adecuados para vehículos pesados de todos los tipos. Un pavimento de asfalto de profundidad completa es aquel en el que se emplean mezclas de asfalto para todas las capas sobre la subrasante o subrasante mejorada y se coloca directamente sobre la subrasante preparada. Los pavimentos de asfalto de profundidad total tienen las siguientes ventajas:

- Capas granulares no permeables para atrapar agua y perjudicar el rendimiento.
- Costos de drenaje subterráneo nulos o reducidos.
- Acelera la construcción.
- Proporciona y conserva una estructura de pavimento uniforme.
- Menos afectado por la humedad y las heladas.

Los estudios muestran que los contenidos de humedad no se acumulan en las sub-capas debajo de las estructuras de pavimento de asfalto de profundidad completa tanto como debajo de los pavimentos con bases granulares. Por lo tanto, hay poca o ninguna reducción en la resistencia de la subrasante.

Elimina la necesidad de drenaje de base a través de la berma, lo que permite una reducción sustancial en la cantidad requerida de material de base de alta calidad.

Todos los materiales que se utilizarán en la estructura del pavimento de asfalto se deben muestrear, probar y evaluar para cumplir con los requisitos de calidad necesarios.

Estadísticamente, una muestra se define como una porción de una población elegida para representar a la población total. La población aquí se refiere a un lote que puede definirse como una cantidad medida de material o construcción producida por el mismo proceso que posee alguna característica común especificada. Los ejemplos son: un área de suelo bien definida, la producción de un día de una planta mezcladora de asfalto o un número finito de cargas de mezcla de asfalto.

Quizás la mejor técnica de muestreo que se haya diseñado es la conocida como muestreo aleatorio. El lugar de muestreo se selecciona de tal manera que todas las ubicaciones posibles en el lote que se investigará tienen la misma probabilidad de ser elegidas (excepto por cargas de mezcla de asfalto-agregado donde el lado y la profundidad del lecho del camión pueden interferir con el muestreo). La elección es imparcial porque está hecha completamente por casualidad. Los planes de muestreo aleatorio se describen en los manuales del Asphalt Institute, MS-10, MS-11, MS-17 y MS-22.

2.5.3.2. Muestreo de suelo

Se deben realizar suficientes perforaciones en el suelo en las áreas pavimentadas propuestas y en las áreas potenciales de préstamo para permitir una identificación de los diferentes tipos de suelo que se encontrarán. Amplias cantidades de cada tipo de suelo se deben tomar para la prueba y evaluación. Se deben preparar perfiles de suelo. El Manual de Suelos, Serie del Manual No. 10 (MS-10), The Asphalt Institute, incluye información sobre el levantamiento de suelos. Sin embargo, para asegurar muestras representativas, se deben utilizar técnicas aleatorias para seleccionar ubicaciones de muestreo.

Una vez obtenidas las muestras de suelo, se analizan para determinar el tamaño de los granos, el contenido de humedad y las propiedades de resistencia. Entonces, el suelo se clasifica de acuerdo a las propiedades que pueden afectar a su rendimiento en la sub-base.

Tabla 10. Pruebas de suelos de subrasante y tamaños de muestras

Nombre común del ensayo	Uso	Métodos de prueba		Tamaño aprox. de la muestra	Propósito del ensayo
		AASHTO	ASTM		
Limite liquido	Clasificación	T 89	D 4318	25 Kg (5 Lb)	Encuentre el contenido de agua en el límite entre estado líquido y plástico.
Limite plástico	Clasificación	T 90	D 4318	25 Kg (5 Lb)	Encuentre el contenido de agua en el límite entre estado plástico y el semisólido.
Índice de plasticidad	Clasificación	T 90	D 4318	25 Kg (5 Lb)	Encuentre el rango de contenido de agua en que el suelo está en un estado plástico.
Análisis mecánico	Clasificación	T 88	D 422	25 Kg (5 Lb)	Determine la distribución del tamaño de la partícula de un suelo.
Compactación	Relación de humedad-densidad	T 180	D 1557	11 Kg (25 Lb)	Determinar la densidad máxima en un esfuerzo de compactación dado y el contenido de agua al que puede alcanzar.
CBR	Base para el diseño de espesor	T 193	D 1883	7 Kg (15 Lb)	Determine la capacidad de carga portante. Los resultados se usan para encontrar el módulo de resiliencia aproximado.
Valor-R	Base para el diseño de espesor	T 190	D 2844	9 Kg (20 Lb)	Determine la capacidad de carga portante. Los resultados se usan para encontrar el módulo de resiliencia aproximado.
Modulo resiliente Mr	Base para el diseño de espesor	Manual del instituto del asfalto MS-10		11 Kg (25 Lb)	Determine el módulo de resiliencia del suelo de la subrasante.

Fuente: AASHTO (Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte) ASTM (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales)

2.5.3.3. Clasificación del suelo

Dos sistemas de clasificación de suelos son de uso general. Ambos se basan en la distribución del tamaño de partícula y en ciertas propiedades del suelo evaluado a diversos contenidos de humedad. Estas son la Clasificación de Suelos AASHTO y la Clasificación de Suelos Unificados. Estos sistemas se utilizan como una base de comparación con otros suelos que tienen características de rendimiento conocidas. La tabla 10, ofrece la clasificación junto a pruebas utilizadas para la preparación de muestras de suelos de subrasante. (Asphalt Institute, 2006).

Ambos sistemas de clasificación se describen en detalle en el Manual de suelos, Manual Series No. 10 (MS-10), Asphalt Institute.

2.5.3.4. Valor de la subrasante de diseño

El valor de la subrasante de diseño es la base para el diseño del espesor de la estructura del pavimento de asfalto. Se determina a partir de pruebas realizadas en suelos de subrasante. En estas pruebas, el suelo se somete a un análisis de carga-deformación, siendo los suelos más fuertes los que tienen las propiedades de mayor resistencia a la carga en las condiciones de la prueba. El valor de la subrasante de diseño utilizado en el procedimiento de diseño de espesor descrito en este manual es el módulo resiliente (M_r).

Se pueden utilizar cuatro pruebas para describir M_r :

- Medida directa mediante el ensayo de módulo resiliente (M_r).
- Aproximación de la prueba de California Bearing Ratio (CBR).
- Aproximación de la prueba del valor de resistencia (R).
- Aproximación de la prueba de rodamiento de placa.

Los procedimientos para las pruebas anteriores se describen en su totalidad en el Manual de Soils del Instituto de Asfalto, Serie de manuales No. 10 (MS-10).

Una vez determinados los valores de resistencia de la subrasante, se selecciona el valor de la subrasante de diseño. El valor de la subrasante de diseño se define como el valor del

módulo resiliente de la subrasante (M_r) que es igual o superior al 85 por ciento de todos los valores de M_r en el lote.

- M_r puede determinarse directamente mediante la prueba de módulo de subrasante.
- M_r puede aproximarse a partir de los valores de prueba CBR de acuerdo con la relación:

$$MR \text{ (MPa)} = 10.3 \text{ CBR o}$$

$$MR \text{ (psi)} = 1500 \text{ CBR}$$

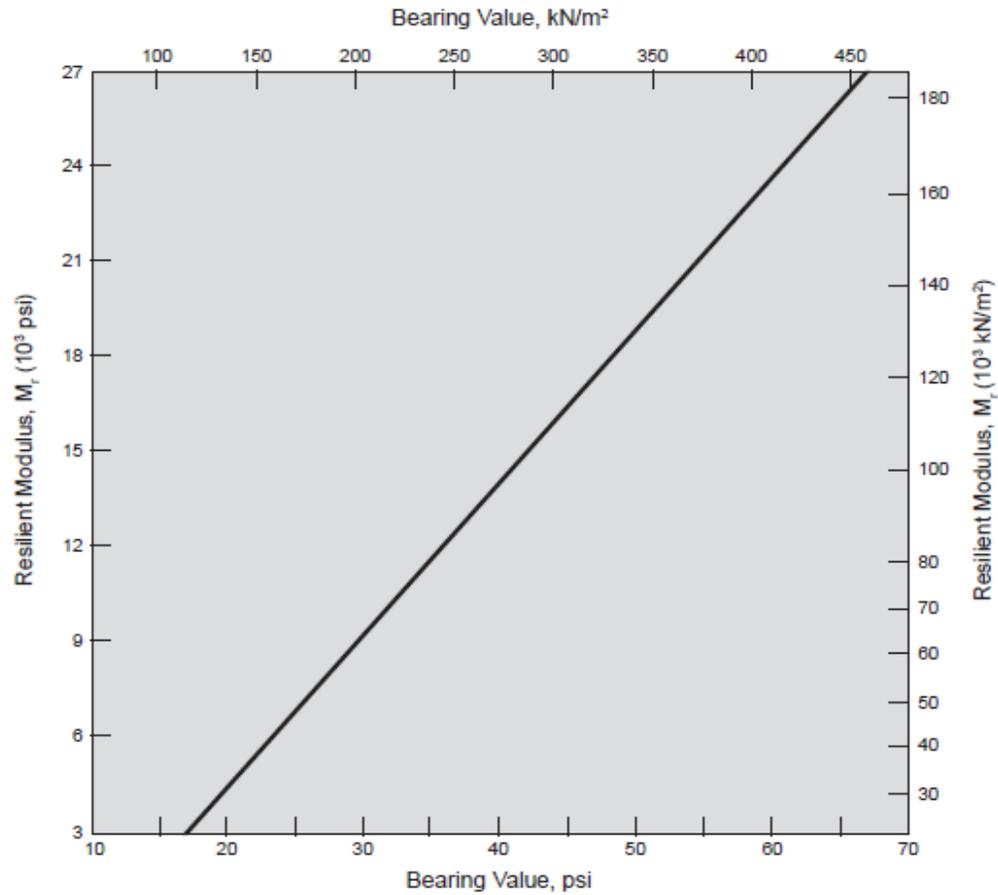
- M_r puede aproximarse a partir de los resultados de la prueba del valor R de acuerdo con la relación:

$$Mr \text{ (MPa)} = 8.0 + 3.8(\text{valor R}) \text{ o}$$

$$Mr \text{ (psi)} = 1155 + 555 (\text{valor R})$$

- M_r puede aproximarse a partir del valor de la prueba del rodamiento de la placa utilizando la tabla de correlación, figura 2.

Figura 2. Relación aproximada entre placa que lleva valor y modulo resiliente Mr



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

El procedimiento para determinar el Módulo Resiliente de Subrasante de Diseño (M_r) es el siguiente:

1. Pruebe de seis a ocho muestras de subrasante y determine M_r directamente o convierta CBR, valor R o valor de rodamiento de la placa para obtener el módulo elástico.
2. Ordene todos los valores de prueba en orden numérico.
3. Para cada cambio en el valor de la prueba, comenzando con el valor más bajo, calcule el porcentaje del número total de valores que es igual a, o mayor que.
4. Trace los resultados en papel de corte transversal.

5. Dibuje una curva suave y de mejor ajuste a través de los puntos trazados (Nota: si los datos de prueba están bien distribuidos, la curva debe tener forma de S y el valor del percentil 50 debe acercarse al promedio de los datos).

6. Lea de la curva el valor de resistencia de la subrasante al 85 por ciento. Este es el valor de resistencia de subrasante de diseño.

2.5.3.5. Efectos ambientales

En la evaluación de la resistencia de materiales de subrasante no tratados, se deben considerar los factores que pueden afectar negativamente las propiedades de soporte de carga de los materiales. Los factores más críticos son la humedad, y el cambio de volumen.

La prueba de módulo elástico (M_r) y el método de CBR saturado toman en cuenta los efectos críticos de la pérdida de resistencia debido al grado de saturación e hinchazón de los suelos. La acción de las heladas se puede evaluar sobre la base de la agitación durante el período de congelación o el debilitamiento del suelo durante el período de fusión de las heladas. El método de diseño en este trabajo reconoce la capacidad de soporte reducida de la subrasante en ambientes donde la escarcha puede ser un problema.

2.5.3.6. Mezclas de asfalto-agregado

Los procedimientos de diseño de espesor detallados en este trabajo son para asfalto de profundidad completa estructuras de pavimento compuesto enteramente de mezclas de concreto asfáltico.

Las propiedades del diseño de la mezcla deben cumplir con los requisitos de la agencia que lo especifica. Los requisitos generales para Superpave se describen en (SP-2), Superpave Mix Design. El proceso de diseño de la mezcla Marshall se describe en (MS-2), Métodos de diseño de mezcla para concreto asfáltico. En Colombia se describe en las Especificaciones generales de construcción de carreteras y Normas de Ensayos 2013. Sección 700 Materiales y Mezclas asfálticas.

2.5.3.7. Criterios de diseño de las mezclas

Debido a que estos pavimentos deben soportar cargas extremadamente pesadas, la mezcla de asfalto y agregado debe estar bien diseñada. Se sugiere que las mezclas de asfalto cumplan con los requisitos de los niveles de compactación más altos.

2.5.3.8. Criterios de compactación de concreto asfáltico

Para establecer una densidad objetivo más realista, las muestras de la mezcla de plantas deben compactarse en el sitio de trabajo o en el laboratorio de campo. El Instituto de asfalto recomienda el siguiente procedimiento: Divida la producción de la mezcla en lotes, cada lote equivale a la mezcla producida durante un día no debe exceder las 3.000 toneladas. Determine la densidad objetivo para cada lote midiendo la densidad promedio de especímenes preparados en laboratorio que representan submuestras elegidas al azar tomadas de camiones que entregan la mezcla al sitio de trabajo.

La densidad compactada del pavimento debe determinarse a partir de pruebas de densidad nuclear o muestras de testigos. La prueba o muestreo de núcleo se debe hacer en secciones de pavimento construidas con las mismas cargas de camión de la mezcla de la que se tomaron las submuestras de densidad objetivo. Se recomienda que se realicen cinco determinaciones de densidad de campo en cada lote de la base y superficie compactadas. El promedio de estas cinco determinaciones de densidad debe ser (1) igual o superior al 96 por ciento de la densidad promedio de las muestras preparadas en laboratorio, y ninguna determinación individual debe ser inferior al 94 por ciento o (2) igual o superior a 92 el porcentaje de la gravedad específica máxima teórica y ninguna determinación individual debe ser inferior al 90 por ciento.

Consulte el Capítulo 7 de (MS-22), Construcción de pavimentos de asfalto de mezcla caliente, para obtener instrucciones sobre cómo determinar la densidad objetivo y la densidad relativa.

2.5.3.9. Importancia del drenaje adecuado

El drenaje adecuado, la nivelación y la construcción son importantes para garantizar un buen rendimiento de las áreas pavimentadas de asfalto. Las áreas pavimentadas grandes, a menudo encontradas en instalaciones portuarias y áreas de carga de remolque de ferrocarril, por ejemplo, requieren atención especial para proporcionar drenaje y protección adecuados tanto de las fuentes de agua superficiales como subterráneas. Las pendientes adecuadas y una superficie lisa evitan los "espejos de agua" y la compactación es importante para evitar la consolidación bajo las pesadas cargas involucradas.

2.5.3.10. Drenaje

El drenaje de grandes áreas pavimentadas presenta algunos problemas especiales. Los procedimientos de diseño detallados en el manual del Asphalt Institute, *Drainage of Asphalt Pavement Structures*, Manual Series No. 15 (MS-15) y *Airport Drainage*, una publicación de la Federal Aviation Administration, se pueden usar en muchos casos.

Las grandes áreas pavimentadas deben inclinarse desde la línea central hasta los bordes y las estructuras de drenaje lo suficiente como para proporcionar un rápido escurrimiento de agua. El The Asphalt Institute recomienda una pendiente mínima del 2 por ciento, 20 mm / m (1/4 in / ft).

2.5.3.11. Compactación de subrasante

Aunque la compactación aumenta la estabilidad de la mayoría de los suelos, algunos suelos disminuyen su estabilidad cuando se escarifican, se trabajan y se laminan. También hay algunos suelos que se contraen excesivamente durante los períodos secos y se expanden excesivamente cuando se les permite absorber la humedad. Cuando se encuentran estas condiciones, se requiere un tratamiento especial. Los suelos en los que se producen estas condiciones son:

- Arcillas que pierden fuerza cuando se remodelan
- Sedimentos que se vuelven "rápidos" cuando se vuelven a suelos con características expansivas.

Si es difícil obtener la compactación requerida en un material dado, puede ser necesario reducir el espesor de la capa. Algunos tipos de suelo, como los limos micáceos, son extremadamente difíciles de compactar en cualquier condición. Si este u otros suelos problemáticos se encuentran, se necesita un tratamiento especial.

Las presiones de contacto más altas mejoran la compactación, particularmente con materiales granulares. Sin embargo, las presiones de contacto no deben ser tan altas como para cortar el suelo. Con rodillos neumáticos cansados, las presiones de contacto pueden incrementarse más y con mayor facilidad al aumentar la presión de los neumáticos que al agregar peso.

2.5.3.12. Compactación de concreto asfáltico

Cuando se trata de cargas pesadas de ruedas, la compactación adecuada es esencial. La estabilidad, o la resistencia a la deformación por corte, se desarrollan en una mezcla al poner las partículas de agregado en contacto íntimo entre sí mediante la compactación adecuada. Esto asegura la fricción entre partículas que resiste el desplazamiento del pavimento bajo carga.

La durabilidad está directamente relacionada con el grado de permeabilidad de un pavimento: cuanto más impermeable sea el pavimento, más duradero será. Y un alto grado de impermeabilidad resulta solo cuando una mezcla de asfalto y agregado bien diseñada y fabricada se compacta a fondo. El aire y el agua pasarán por una mezcla permeable y oxidar el asfalto, dando lugar a fragilidad prematura y susceptibilidad a la fractura del pavimento.

La resistencia a la tracción de una mezcla se desarrolla por el esfuerzo de compactación que presiona las partículas de agregado lo suficientemente cerca para permitir que el asfalto y los finos realicen su función de cementación.

Muchas partes de grandes áreas pavimentadas no pueden ser tocadas por el tráfico neumático-cansado, mientras que otras partes pueden haber canalizado el funcionamiento de los vehículos. El equipo de expansión puede proporcionar una superficie lisa, pero es necesaria una compactación completa y adecuada a la densidad requerida si la suavidad debe soportar cargas pesadas.

Por todas las razones dadas en esta sección, es esencial que el grado especificado de compactación de la estructura del pavimento flexible se consiga durante la construcción. Los tipos y pesos de los rodillos que alcanzarán la densidad requerida se deben seleccionar, mediante prueba, si es necesario, y utilizarse.

Todos los equipos de compactación actualmente disponibles con suficiente capacidad pueden compactar espesores gruesos de concreto asfáltico de manera efectiva.

Para obtener más información sobre cómo colocar y compactar mezclas de asfalto, consulte a Construcción de pavimentos de asfalto de mezcla caliente, serie manual No. 22 (MS-22).

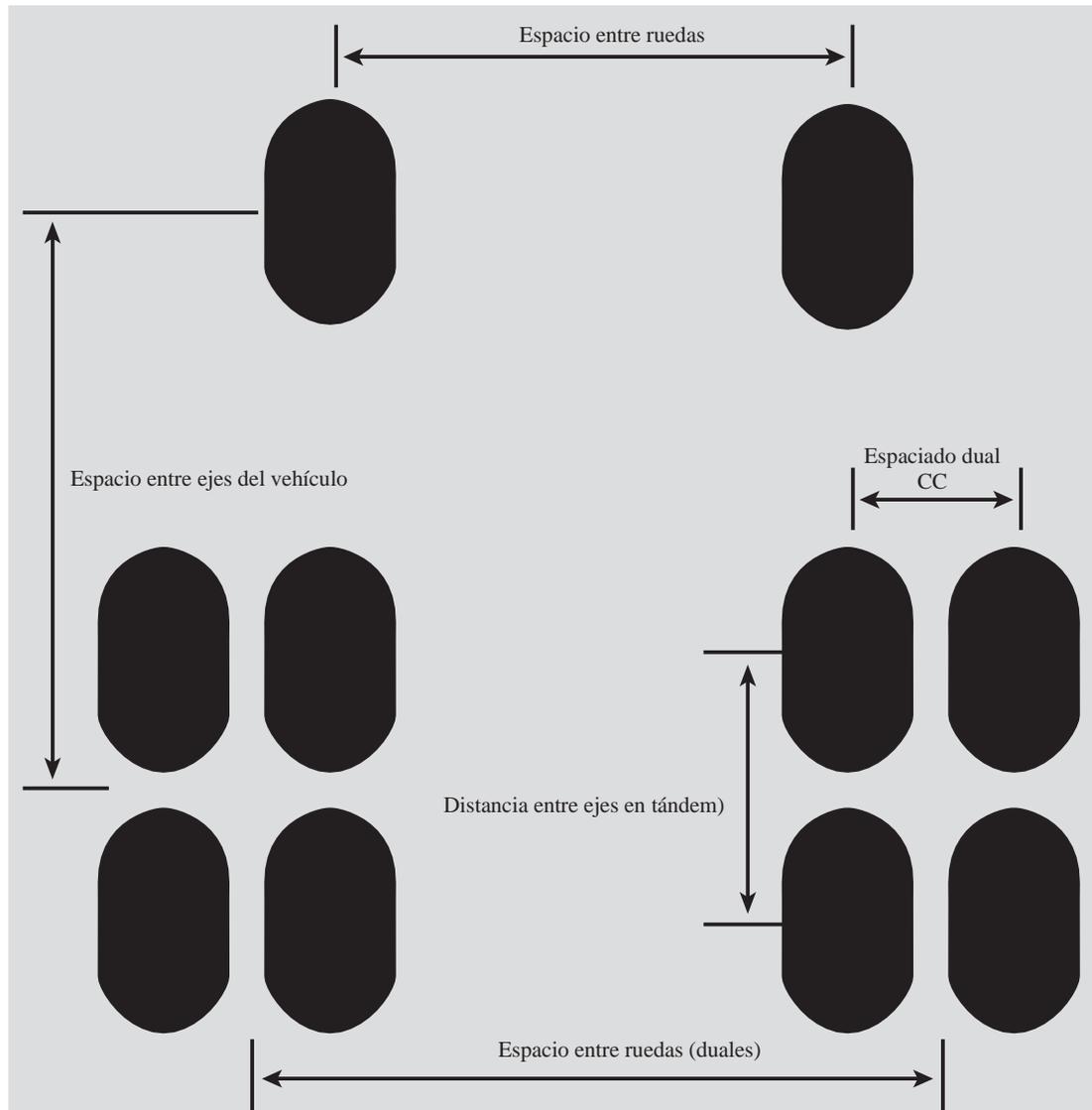
2.5.4. Características del vehículo y datos de los neumáticos

2.4.4.1. Configuraciones típicas de carga de ruedas

El método de diseño trata tres tipos de problemas: carga de una sola rueda, carga de dos ruedas y problemas de carga de varias ruedas.

Los problemas de carga de ruedas dobles y múltiples se resuelven determinando la carga equivalente de una sola rueda. Los problemas de diseño de carga de una sola rueda son razonablemente simples, y solo requieren la magnitud de la carga de la rueda (P), las presiones de contacto del neumático con el suelo (p) y el radio de contacto (a). Los problemas de ruedas dobles y múltiples son más complicados y requieren información adicional sobre el espaciado de las ruedas. Las dimensiones típicas requeridas se muestran en la figura 3.

Figura 3. Dimensiones típicas requeridas



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

2.5.4.2. Datos de entrada requeridos

La solución de los problemas de diseño de una sola rueda utilizando el método de este trabajo requiere al menos los siguientes datos de vehículos y neumáticos.

Todos los diseños se determinan asumiendo que la carga se transmite al pavimento en un área cargada circularmente. El radio (a) de esta área circular equivalente es requerido por el procedimiento de diseño. El radio del área circular equivalente se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

Si se conoce el área de contacto

$$a = \sqrt{\frac{(\text{area})}{\pi}}$$

Si se conoce la presión de contacto

$$a = \sqrt{\frac{P}{p\pi}}$$

Donde:

P = Carga de rueda individual en kilonewtons (libras).

p = Presión de contacto suelo-neumático en kilopascales (psi). Radio de área circular en milímetros (pulgadas) correspondiente a una carga

a = kilonewtons (libras), P, con presión de contacto, p, en kilopascales (psi).

La solución de los problemas de doble carga de ruedas requiere que se determine el espacio entre los neumáticos.

D = Distancia de centro a centro entre llantas en milímetros (pulgadas).

Los problemas de ruedas múltiples requieren conocimiento del espacio entre las ruedas y los ejes. La siguiente variable se calcula a partir de datos de espaciado de rueda, y se utiliza en el procedimiento.

r = Distancia de desplazamiento radial en milímetros (pulgadas) desde cada neumático a las ubicaciones de prueba para una tensión máxima.

2.5.4.3. Presión de contacto de la llanta y área cargada

El conocimiento de la carga de la rueda y la presión de inflado de los neumáticos proporciona una aproximación de la presión de contacto del neumático y un medio para determinar el área de contacto del neumático. Sin embargo, es preferible utilizar la presión de contacto real y el área de neumáticos que se utilizará en la instalación. Información pertinente de esta naturaleza es publicada por los fabricantes de neumáticos.

El procedimiento de diseño se basa en la suposición de que todas las presiones de contacto son iguales. Usualmente, este es el caso. Sin embargo, en algunos casos, los neumáticos usados en las ruedas delanteras tendrán diferentes presiones de contacto que las utilizadas en la parte trasera del vehículo. Con frecuencia, las ruedas delanteras están lo suficientemente lejos de la ubicación de máxima tensión que la suposición de presión de contacto igual a la de las ruedas traseras no dará lugar a un error significativo.

2.5.4.4. Determinación de las presiones de contacto con el suelo

Es importante que las presiones de contacto con el suelo se determinen con precisión para los neumáticos cargados utilizados para diseñar el pavimento. Para esta determinación se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Estimar la densidad del material que se va a transportar o mover.
2. Estime la capacidad de carga del equipo. Utilice los cuadros de equipos de los fabricantes como guía, pero considere cualquier desviación de las capacidades estándar; aparadores, etc.
3. Calcule la carga útil.
4. Usando el peso bruto del vehículo y la distribución del eje de las tablas de los fabricantes, calcule las cargas del eje. Agregue cualquier masa (peso) significativa aportada por el equipo opcional. La división de la carga del eje por la cantidad de neumáticos por eje da carga por neumático.

2.5.4.5. Determinación de las características de carga de diseño

En muchos casos, el uso de cargas de capacidad puede ser conservador, y es posible hacer diseños menos conservadores pero adecuados que utilicen cargas máximas menores que las cargas máximas nominales.

Dos factores están involucrados: la carga de diseño y el número de repeticiones esperadas en la carga de diseño. Los ingenieros de diseño deben ser conscientes de que el uso de una carga del 100 por ciento y el tráfico canalizado puede llevar a un sobre diseño.

Un estudio reveló que el uso de una carga de diseño del 60 por ciento de la capacidad nominal del vehículo produciría un diseño que sería adecuado aproximadamente el 88 por ciento del tiempo.

El número de repeticiones cargadas variará considerablemente, dependiendo de la disposición geométrica y otras disposiciones físicas en la instalación, el tamaño de la carga y muchas otras características.

2.5.5. Procedimiento de diseño

2.4.5.1. Pasos en el diseño

El análisis de diseño básico se da en términos de una única carga de ruedas de cierta magnitud (P) y una presión de contacto suelo-neumático (p). Sin embargo, muchos vehículos tienen varias ruedas ubicadas lo suficientemente cerca una de la otra para que se tenga en cuenta la influencia combinada de las cargas de ruedas múltiples. Esto se hace calculando una carga de rueda individual equivalente para representar la condición de rueda múltiple. La influencia combinada de las cargas de ruedas adyacentes se determina mediante el uso de factores de deflexión de la interfaz. Las deflexiones se calculan en la superficie de la subrasante bajo la carga de ruedas múltiples, y se determina una carga de rueda individual equivalente que producirá una deflexión igual. La carga de una rueda equivalente se usa para diseñar el espesor del pavimento.

Los pasos en el procedimiento de diseño se muestran en el diagrama de flujo posterior; estos pasos se presentan a continuación:

1. El primer paso es determinar si el problema puede considerarse un problema de carga de una rueda, doble o múltiple. Esta determinación depende principalmente del espaciado entre ruedas.

2. A partir de la carga de la rueda y la información de configuración, determine si el problema puede considerarse un problema de carga de una sola rueda. Si es así, proceda al siguiente paso. De lo contrario, siga el procedimiento para problemas de carga de ruedas duales o múltiples, respectivamente.

3. Determine el módulo resiliente de subrasante de diseño (M_r).

4. Para problemas de carga de una sola rueda, es necesario determinar la siguiente variable de entrada:

(1) Carga de rueda individual (P).

(2) Presión de contacto suelo-neumático (p).

(3) Área de contacto de la llanta (a).

(4) Número de repeticiones de carga.

5. Seleccione una tabla de diseño o diagrama de diseño apropiado.

6. Determine el valor (T_A / a) de diseño directamente de la tabla o gráfico apropiado y calcule el T_A de diseño de la siguiente manera: $T_A (T_A / a) \times a$.

(1) Espesor del pavimento de asfalto de profundidad total en milímetros (T_A)

Los problemas de carga de rueda doble y de rueda múltiple se resuelven mediante una solución gráfica de la intersección de dos relaciones T_A versus carga: una relación permisible T_A versus P , o una carga equivalente (P_e) versus relación T_A .

2.5.5.2. Determinación del tipo de problema

Si un problema de diseño puede tratarse como una sola rueda depende del espacio entre ruedas del vehículo de diseño. Si las ruedas están separadas por una distancia superior a ocho veces el radio del área circular cargada (a), determinada como se describió anteriormente, el problema puede tratarse como un problema de diseño de una sola rueda.

Sin embargo, si la distancia entre ruedas es inferior a ocho veces el radio de carga, el problema debe tratarse como un problema de carga de rueda doble o un problema de carga múltiple.

El método de diseño aumenta en complejidad a partir de cargas de una sola rueda, a través de cargas de dos ruedas a múltiples problemas de carga de las ruedas. Por lo tanto, puede ser posible ahorrar un tiempo considerable en llegar a una solución determinando si se puede tratar un problema aparente de carga de múltiples ruedas como un problema de carga de rueda doble, una sucesión de problemas de carga de rueda doble, o simplemente como un problema de diseño de carga de una sola rueda.

Tanto en problemas de ruedas dobles como múltiples, el diseño T_A está determinado por un único equivalente carga de la rueda calculada en el punto de máxima deflexión de la subrasante. Para ruedas dobles este punto ocurre a mitad de camino entre los dos neumáticos. Para configuraciones de carga de ruedas múltiples, el punto de la deflexión máxima de la subrasante puede ocurrir debajo de una rueda, a medio camino entre dos ruedas en el eje trasero, a medio camino entre todas las ruedas del vehículo o en algún punto intermedio, dependiendo de las dimensiones y la magnitud relativa de las cargas en las ruedas individuales. En el diseño de ruedas múltiples contiene recomendaciones para determinar este punto de subrasante máxima deflexión para configuraciones relativamente estándar. Sin embargo, para vehículos que tienen otras dimensiones y cargas relativas de las ruedas, puede ser necesario investigar varias ubicaciones diferentes.

2.5.5.3. Procedimiento de diseño para cargas de una sola rueda

El diseño estructural de un pavimento asfáltico para cargas pesadas de las ruedas depende del número y la magnitud de las cargas de las ruedas que se impondrán sobre el pavimento; presión de contacto; condiciones ambientales, como temperatura y efectos de congelación-descongelación; resistencia de la subrasante; y materiales del pavimento i propiedades. En este procedimiento, el espesor permisible de un pavimento de asfalto de profundidad total se determina en términos de p y T_A/a .

Donde:

T_A = Espesor del pavimento de asfalto de profundidad total en milímetros (pulgadas)

a = Radio de la carga equivalente de una sola rueda en milímetros (pulgadas)

P = Presión de contacto del neumático con el suelo en kilopascales (libra por pulgada cuadrada = psi)

Los valores de T_A/a se seleccionan del cuadro I tabla 12 o del cuadro II tabla 13, dependiendo de la región climática en la que se encuentra la instalación.

La selección del cuadro I o del cuadro II se realiza sobre la base de los siguientes criterios:

La selección del cuadro I o del cuadro II se realiza sobre la base de los siguientes criterios:

Tabla 11. Condiciones climáticas

Cuadro Nº	Condiciones climáticas (Promedio de 30 años)	Condiciones de la subrasante
I	Aproximadamente 3 meses con temperaturas diarias promedio de 0° C (32° F) o menos. Temperatura promedio anual de 13° C (55° F) o menos.	Subrasante sujeta a debilitamiento por heladas. Aumento gradual desde la condición de primavera débil hasta el módulo de diseño a principios del otoño
II	Sin temperaturas bajo cero. Temperatura diaria anual superior a 13° C (55° F)	El módulo de la subrasante permanece razonablemente constante, durante todo el año, al valor de diseño

Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

Una vez que se ha seleccionado la tabla apropiada, los valores de T_A/a se leen directamente para los valores del módulo elástico de la subrasante (M_r), la presión de contacto de los neumáticos (p) y el número de diseño de repeticiones de carga. T_A/a se convierte en T_A de la siguiente manera:

El valor del radio de contacto del neumático (a) se determina como se explicó anteriormente. El espesor de diseño se calcula multiplicando T_A/a por a .

El Instituto de Asfalto recomienda que se utilice un espesor mínimo de hormigón asfáltico, T_A , de 180 mm (7 pulg.) Para diseños de carga de rueda pesada.

Tabla 12. Cuadro I. Diseño T_A/a Valores para el promedio anual diario Temperatura promedio anual de 13° C (55° F) o menos

Subrasante M_r (CBR)	Repeticiones de carga	Contacto del suelo del neumático. Presión KPa (psi)					
		275 40	415 60	550 80	690 100	1035 150	1380 200
32 Mpa 4500 psi 3	10000	0,68	0,93	1,14	1,31	1,68	2,01
	100000	0,82	1,15	1,39	1,59	2,01	2,36
	1000000	1,08	1,42	1,68	1,90	2,39	2,79
50 Mpa 7500 psi 5	10000	0,55	0,80	1,01	1,20	1,55	1,86
	100000	0,74	1,02	1,25	1,43	1,88	2,23
	1000000	0,96	1,27	1,54	1,75	2,25	2,63
100 Mpa 15000 psi 10	10000	0,39	0,59	0,81	0,96	1,33	1,62
	100000	0,52	0,82	1,03	1,23	1,54	1,96
	1000000	0,74	1,06	1,32	1,54	2,00	2,36
150 Mpa 22500 psi 15	10000	0,39	0,48	0,62	0,81	1,17	1,45
	100000	0,39	0,53	0,88	1,06	1,47	1,81
	1000000	0,56	0,90	1,16	1,38	1,82	2,19

Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

**Tabla 13. Cuadro II. Diseño T_A/a Valores para el promedio anual diario
Temperatura diaria anual superior a 13° C (55° F)**

Subrasante Mr (CBR)	Repeticiones de carga	Contacto del suelo del neumático. Presión KPa (psi)					
		275 40	415 60	550 80	690 100	1035 150	1380 200
30 Mpa 4500 psi 3	10000	0,59	0,81	1,00	1,16	1,50	1,79
	100000	0,75	1,00	1,22	1,41	1,79	2,12
	1000000	0,92	1,22	1,46	1,68	2,11	2,47
50 Mpa 7500 psi 5	10000	0,47	0,70	0,88	1,04	1,37	1,63
	100000	0,63	0,87	1,10	1,28	1,66	1,97
	1000000	0,81	1,08	1,33	1,55	1,97	2,33
100 Mpa 15000 psi 10	10000	0,39	0,48	0,67	0,84	1,17	1,44
	100000	0,40	0,67	0,89	1,07	1,45	1,75
	1000000	0,60	0,88	1,13	1,35	1,75	2,10
150 Mpa 22500 psi 15	10000	0,39	0,48	0,55	0,67	1,03	1,29
	100000	0,39	0,51	0,73	0,93	1,30	1,60
	1000000	0,42	0,74	0,96	1,20	1,59	1,93

Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

2.5.5.4. Procedimientos de diseño para cargas de doble rueda

El procedimiento de diseño para problemas de carga de rueda doble requiere conversión a una carga de rueda única equivalente que se puede usar con la tabla 12 o 13 para determinar el espesor requerido.

Los problemas de carga de rueda dual se resuelven mediante una solución gráfica de dos relaciones T_A versus carga, una relación T_A admisible versus P , discutida anteriormente y una relación carga equivalente (P_e) versus T_A .

- **Curvas de diseño de carga de una sola rueda permitidas**

Para todos los problemas de carga de ruedas dobles y múltiples, será necesario elaborar gráficos de diseño. Para diseños de carga de rueda doble y múltiple, un gráfico de T_A versus carga de rueda única (P) es usó. Esta curva se denomina curva de diseño de carga de una sola rueda permitida y se determina como sigue:

1. Determine el diseño de la subrasante M_r
2. Determine la presión de contacto de los neumáticos
3. Seleccione un rango de valores de carga de una sola rueda (P). El valor más bajo debe ser igual a la carga más pesada en un neumático y la más alta aproximadamente el 60 por ciento de la carga total del vehículo.
4. Calcule el radio de contacto (a) para cada carga (P) seleccionada en el paso 3, como se mencionó anteriormente:

$$a = \sqrt{\frac{(\text{area})}{\pi}}$$

$$a = \sqrt{\frac{P}{p\pi}}$$

5. Determine T_A/a de la tabla 12 y tabla 13, para los valores dados de M_r y P .
6. Para cada valor de (a) determinado en el paso 4, calcule:

$$T_A = \left(\frac{T_A}{a} \right) \times a$$

7. Tabular P y T_A como se muestra en la tabla 14 y graficar como se muestra en la figura 4 para obtener la curva de diseño de carga de una sola permitida para el problema

- **Curva de diseño de carga equivalente a una sola rueda**

El procedimiento de solución para la curva de diseño de carga de una sola rueda equivalente (P_e versus T_A) es como sigue:

1. Determine D , el espacio de centro a centro entre neumáticos dobles. La información de espaciado está disponible en los libros de servicio de neumáticos y/o en los fabricantes de neumáticos.
2. Determine la relación de espacio entre ruedas (D/a) para el juego de neumáticos dobles, utilizando el valor del radio de contacto, a , determinado para la carga de un solo neumático (P) (la mitad de la carga de dos neumáticos).
3. Seleccione un rango de valor T_A/a que se utilizará con la Figura 5 para determinar un rango de factores de carga (L). Para la mayoría de los casos, los valores de T_A/a de 1.0 a 4.0 proporcionarán el rango necesario.
4. Calcule (P_e) para cada valor de T_A/a seleccionado

$$P_e = \frac{2 * P}{L}$$

Donde:

P_e = Es la carga equivalente de una sola rueda.

L = Rango de factores de carga.

5. Determine T_A para cada valor de T_A/a seleccionado

$$T_A = (T_{A/a}) * a$$

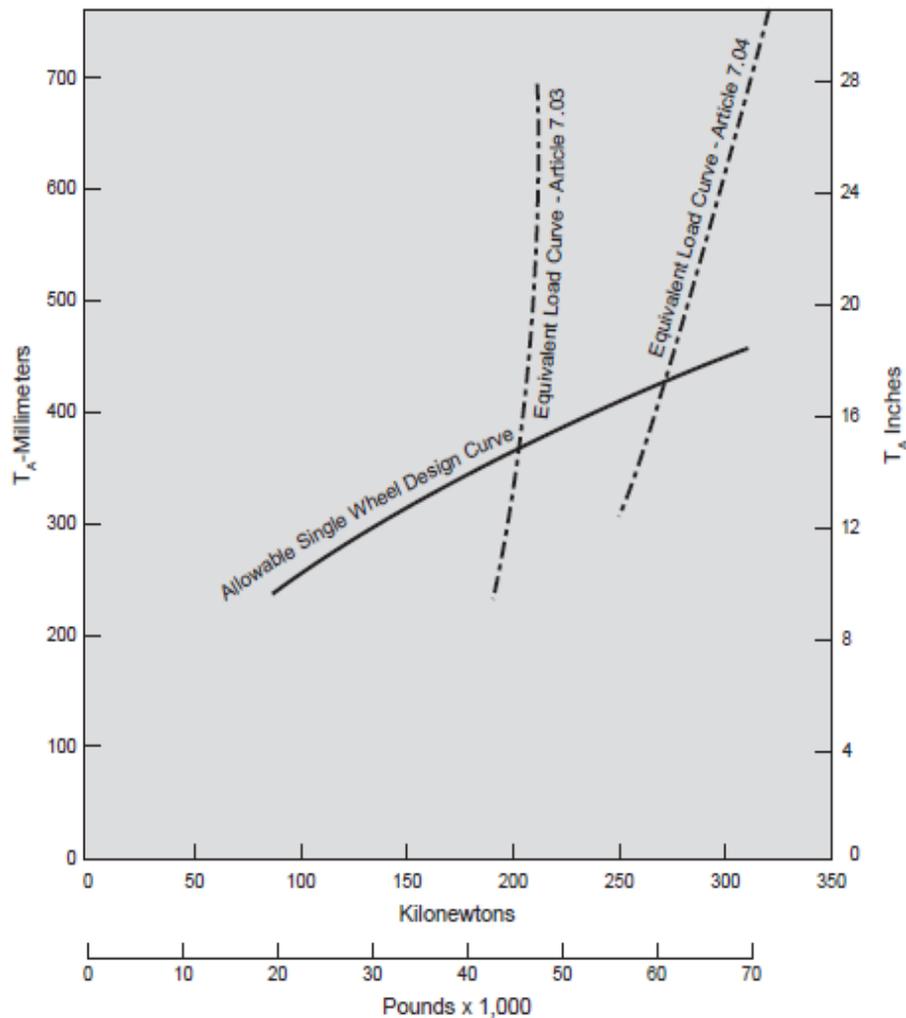
6. Grafique los valores de P_e versus T_A determinados en los pasos 4 y 5

Tabla 14. Datos para la curva de diseño de carga de una sola rueda permitida

P		a		T_A	
kN	(lb)	mm	(in.)	mm	(in.)
88	(19,840)	200	(8.0)	240	(9.6)
132	(29,760)	250	(9.7)	300	(11.6)
176	(39,680)	285	(11.2)	342	(13.4)
221	(49,600)	320	(12.6)	384	(15.1)
265	(59,520)	350	(13.8)	420	(16.6)
309	(69,450)	380	(14.9)	456	(17.9)

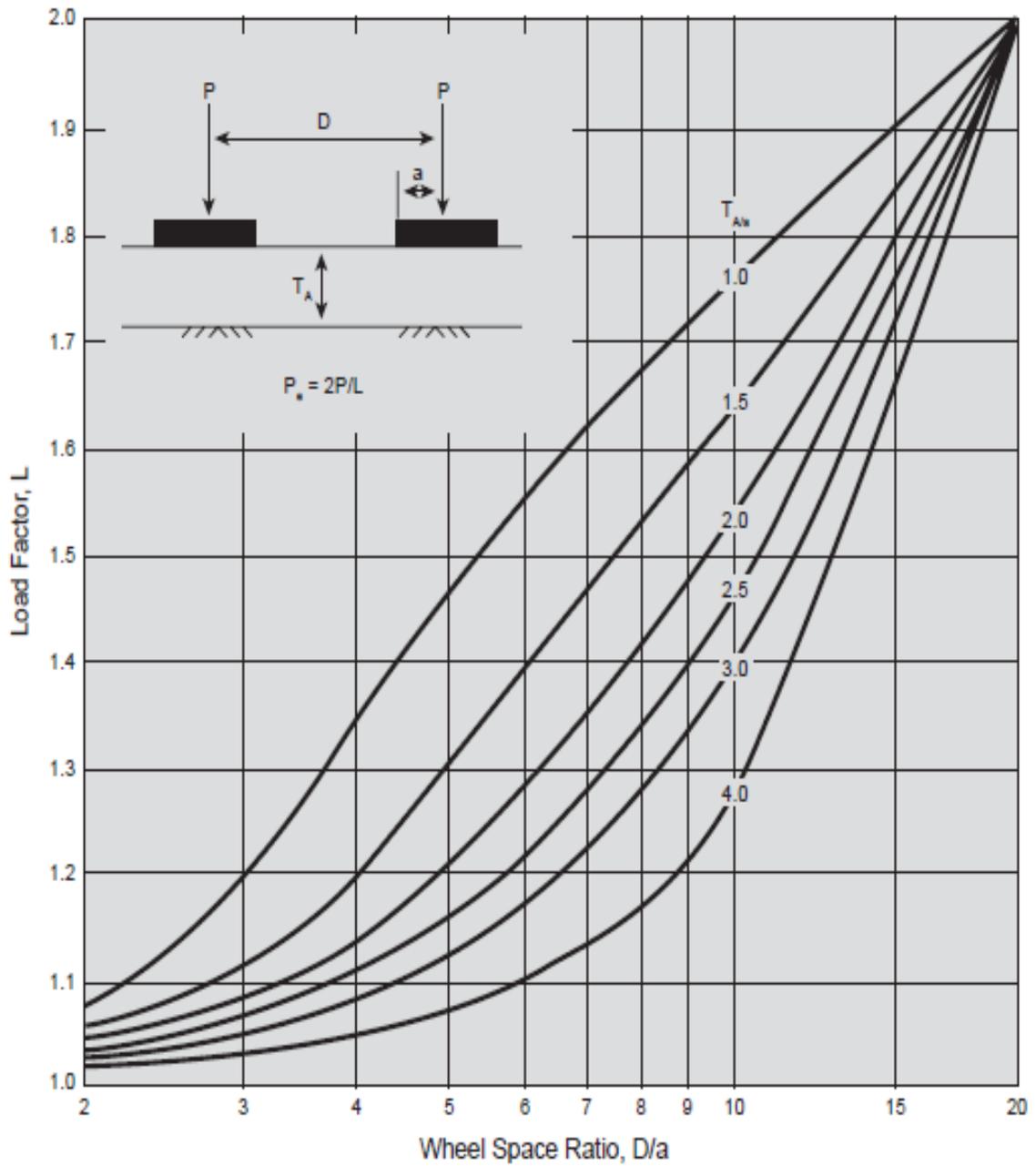
Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

Figura 4. Curvas permitidas versus equivalentes de una sola rueda



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

Figura 5. Factor de carga de rueda doble



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

2.5.5.5. Procedimiento de diseño para múltiples cargas de ruedas

El procedimiento de diseño para problemas de carga de rueda múltiple se basa en la información obtenida de la figura 6 y el procedimiento ya mencionado anteriormente. En general, las tablas 12 y 13 se utilizan para obtener una carga de rueda única permisible (como en el procedimiento para ruedas dobles) versus curva de espesor mientras que la figura 6, se utiliza para determinar una relación entre la equivalente carga de la rueda individual (P_e) y T_A . El diseño T_A está determinado por la intersección de estas dos curvas de la misma manera que para cargas de ruedas dobles.

La curva permisible T_A versus P se determina como se describe en la sección curvas de diseño de carga de una sola rueda permitida. Determinando, sin embargo, la curva equivalente es más compleja y requiere el uso de factores de deflexión de la interfaz.

El método utilizado para calcular la curva P_e versus T_A utiliza factores de deflexión de interfaz desarrollada por Huang para un sistema elástico de dos capas. (Ver Bibliografía.)

Como se muestra en la figura 6, la deflexión de la interfaz (Δ) a cualquier distancia radial dada (r) del centro de carga está dada por:

$$\Delta = \frac{F * p a}{Mr}$$

Donde:

p = Es la presión de contacto del neumático en kPa (psi),

a = Es el radio de contacto del neumático en mm (in),

Mr = Es el módulo resiliente de la subrasante en kPa (psi)

F = Es el factor de deflexión de la interfaz.

El factor F es una función del espesor (T_A/a) y la relación de desplazamiento radial (r/a).

Según la teoría de la superposición, la deflexión total de la interfaz en cualquier ubicación (x, y) bajo cualquier múltiplo. La configuración del engranaje de la rueda ($\Delta x, y$) es la suma de las deflexiones individuales causadas por cada neumático en la coordenada (x, y).

El concepto de utilizar la teoría de la deflexión de la interfaz para determinar la carga equivalente de una sola rueda de un engranaje de ruedas múltiples se basa en la hipótesis de que la carga equivalente de una sola rueda (P_e) causará la misma deflexión máxima (en la superficie de la subrasante) que la que ocurre bajo el sistema de carga de múltiples ruedas. Por lo tanto,

$$\Delta_{\max} = \frac{P_e a_e}{M_r} F_e = \max \sum \left(\frac{P_r a_r F_r}{M_r} \right) \text{ y}$$

$$(\sqrt{P_e} F_e) = \max \sum \sqrt{P_r} F_r$$

Donde:

P_e = Es la carga equivalente de una sola rueda.

P_r = Es la carga en un neumático ubicado a una distancia (r) lejos del punto de máxima deflexión en el sistema de engranajes múltiples.

El valor máximo de F_e para una sola rueda ocurre directamente debajo de la línea central del neumático ($r/a=0$).

Para el sistema de engranajes de ruedas múltiples, no se puede dar una regla específica sobre dónde se producirá una deflexión. Esta ubicación es una función compleja de varios parámetros de entrada. Sin embargo, un análisis en tres ubicaciones específicas normalmente determinará la deflexión máxima. Las tres ubicaciones recomendadas para el análisis son:

- a) Directamente entre las dos cargas de rueda más cercanas (m);
- b) Directamente en el centro del eje cargado (n); y
- c) Centro geométrico de múltiples conjuntos de ruedas (o)

La solución implica encontrar P_e tal que:

$$(\sqrt{P_e} F_e) = C = \max \sum \sqrt{P_r} F_r$$

Esto se logra mediante una solución de prueba y error que involucra valores supuestos de P_e . El valor de P_e para cualquier problema de carga de múltiples ruedas debe estar entre

la carga en un neumático (P) y la carga total. Dado que $P = p_e$ y T_A/a valor para cada valor de P_e supuesto se puede calcular. El valor de F_e espontáneo se determina a partir de la figura 6, a una distancia de desplazamiento radial cero ($r/a = 0$).

Una vez que se determina el valor de F_e correspondiente a un determinado valor de P_e supuesto, se determina el producto ($\sqrt{P_e} F_e$). El P_e real para un espesor dado (T_A) es el valor de P_e que produce ($\sqrt{P_e} F_e$) producto que es igual a C, que es el máximo $\sum \sqrt{P_r} F_r$

El procedimiento se repite para varios valores de T_A (generalmente cuatro de T_A serán suficientes) y la relación P_e resultante frente a T_A se traza de una manera similar a la que se muestra en la figura 8.

- **Curva de carga equivalente de una sola rueda para problemas de carga de múltiples ruedas**

El procedimiento para la obtención de un equivalente curva de carga de rueda simple para múltiples problemas de carga de la rueda implica 15 pasos divididos en tres fases: (1) determinar la máxima factor de deflexión (C) para varios valores de prueba de T_A , (2) determine los valores de P_e para cada valor máximo de C, y (3) grafique los valores de T_A frente a P_e para obtener la curva de carga equivalente de una sola rueda. (Instituto de Asfalto. (2006))

(1) **Determinar los factores de deflexión máxima.** Esto se hace de la siguiente manera:

1. Determine los siguientes valores para el vehículo de diseño.

P =Carga de una sola rueda para cada rueda

p = Presión de contacto

a = Radio de contacto para cada rueda

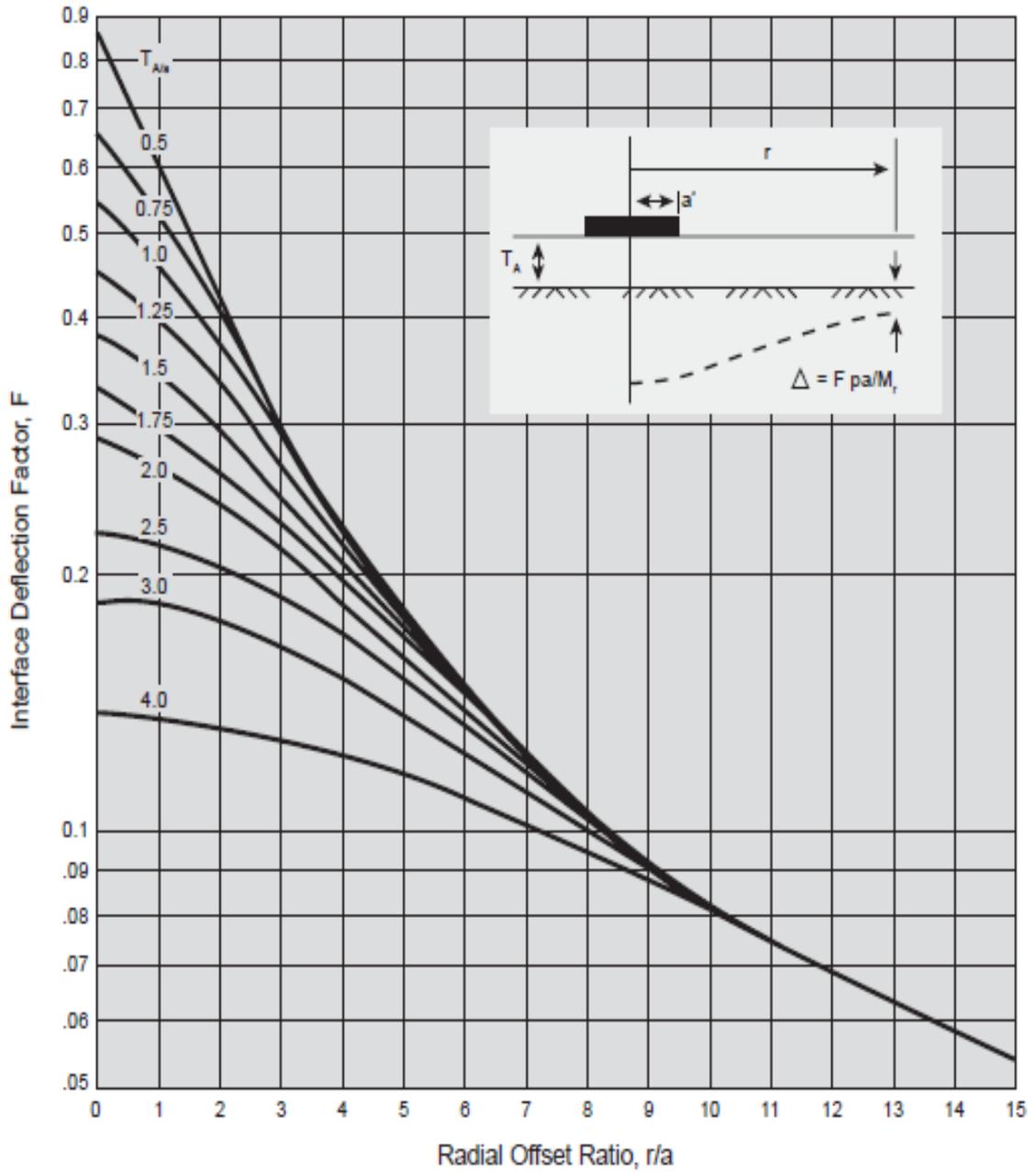
Seleccione las ubicaciones esperadas del punto de máxima deflexión de la interfaz (m, n, o, etc.)

r = Distancias radiales desde cada rueda hasta el punto esperado de máxima deflexión de la interfaz.

2. Seleccione varios valores de prueba de T_A , que van desde aproximadamente $0.5a$ hasta aproximadamente $2.0a$, calculados para la carga de rueda más pesada.
3. Registre los valores determinados en los pasos 1 y 2 en una tabla de la forma ilustrada, según la tabla 14.
4. Calcule los valores de T_A/a y r/a para cada rueda y regístrelos en la tabla.
5. Seleccione los valores del factor de deflexión (F) de la figura 6, correspondientes a los valores de T_A/a y r/a determinados en el paso 4, y regístrelos en la tabla.
6. Calcular \sqrt{PF} para cada rueda y registre estos valores.
7. Suma los valores de \sqrt{PF} en las filas correspondientes de la tabla y registre en la penúltima columna como $\sum\sqrt{PF}$.
8. Para cada valor de T_A utilizado, seleccione el valor máximo de $\sum\sqrt{PF}$ y proceda al siguiente paso. (La ubicación del punto de máxima deflexión está determinada por el valor máximo de $\sum\sqrt{PF}$ llamado C . El punto de ubicación de máxima deflexión puede ser diferente para valores bajos de T_A que los obtenidos para valores altos de T_A).
- (2) **Determinar los valores de P_e .** Los valores de C determinados anteriormente se utilizan para determinar P_e valores correspondientes a cada valor de T_A Seleccionado. Juntos forman los datos para trazar la curva de carga equivalente de una sola rueda. Los valores de P_e están determinados por el uso de una relación entre P_e y C que debe determinarse para cada valor de T_A asumido para la solución.
9. Seleccione valores de P_e que van desde la carga más pesada en una rueda hasta aproximadamente 60 por ciento del peso total del vehículo.
10. Calcule a_e y T_A/a para cada valor asumido de P_e y T_A como se describe previamente, Por lo tanto, utilizando el valor dado de p . Registre en una tabla como se ilustra en la tabla 15.
11. Determine un factor de deflexión de la interfaz F_e en $r/a = 0$ para cada valor de T_A/a_e usando figura 6.
12. Calcular $C \sqrt{P_e} F_e$ para cada valor de P_e y F_e . Consulte la tabla 16.
13. Grafique los valores de C versus P_e para cada valor supuesto de T_A , como se ilustra en la figura 7.

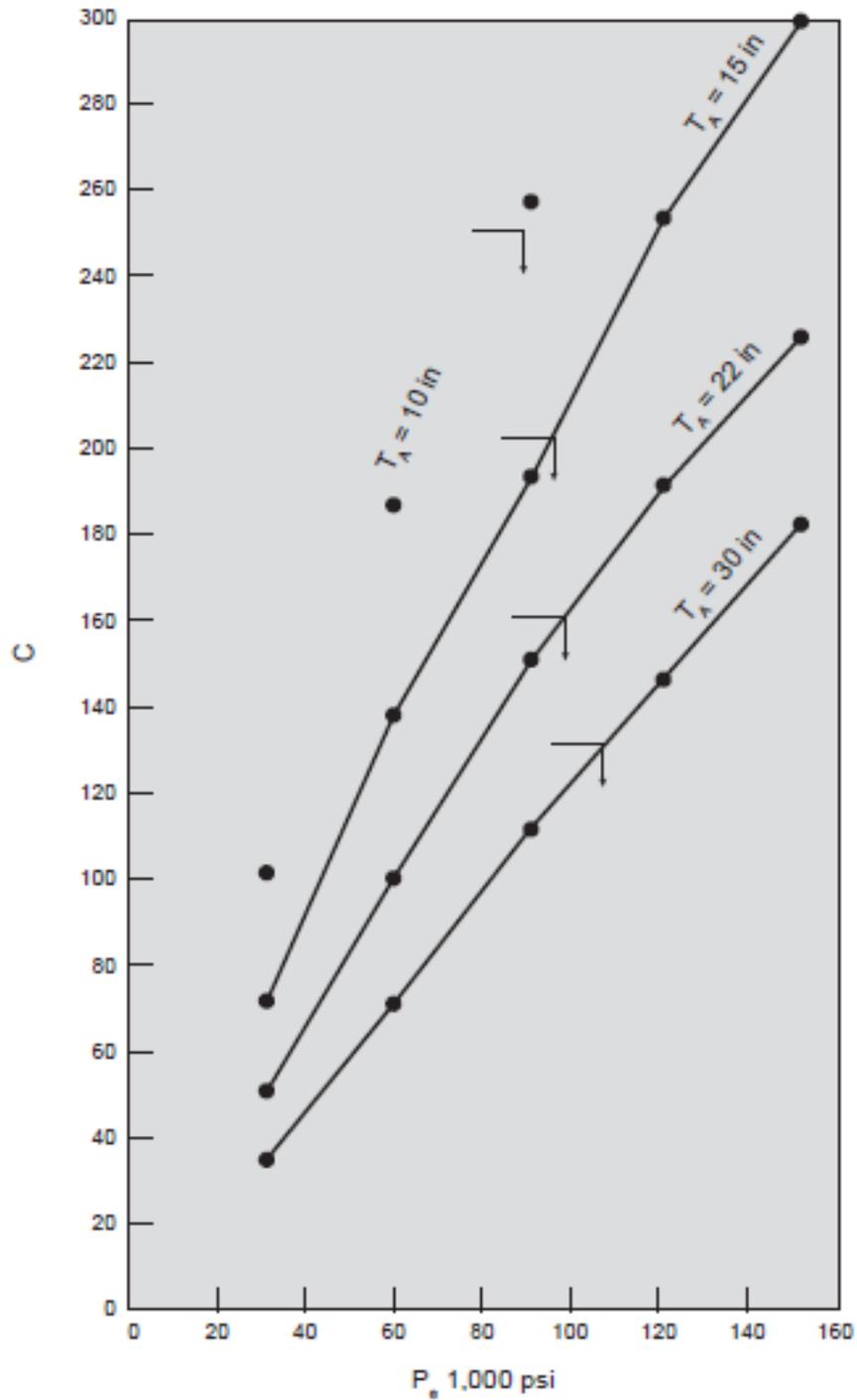
- (3) **Obtenga la curva de carga equivalente de una sola rueda.** Esta curva se obtiene trazando los valores de T_A asumidos en el paso 2 frente a los valores de P_e determinados en el paso 14.
14. Del gráfico de C versus P_e obtenido en el paso 13, obtenga un valor de P_e correspondiente al valor de C determinado en el paso 8 para cada T_A seleccionado.
15. Grafique T_A contra P_e para los valores de C , como se ilustra en la figura 8.

Figura 6. Factores de desviación de interfaz de ruedas múltiples



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

Figura 7. Relación entre P_e y C para diferentes valores de T_A



Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23).

Tabla 15. Formulario de determinación valores $\sum \sqrt{PF}$ y P_e para un problema de carga múltiple de ruedas

T_A	Punto de computación		Numero de llanta				$\sum \sqrt{PF}$	P_e
			1	2	3	4		
		P (lb.) a (in) p (psi)						
in	m	r T_A/a r/a F \sqrt{PF}						
	n	r T_A/a r/a F \sqrt{PF}						
in	m	r T_A/a r/a F \sqrt{PF}						
	n	r T_A/a r/a F \sqrt{PF}						
in	m	r T_A/a r/a F \sqrt{PF}						
	n	r T_A/a r/a F \sqrt{PF}						

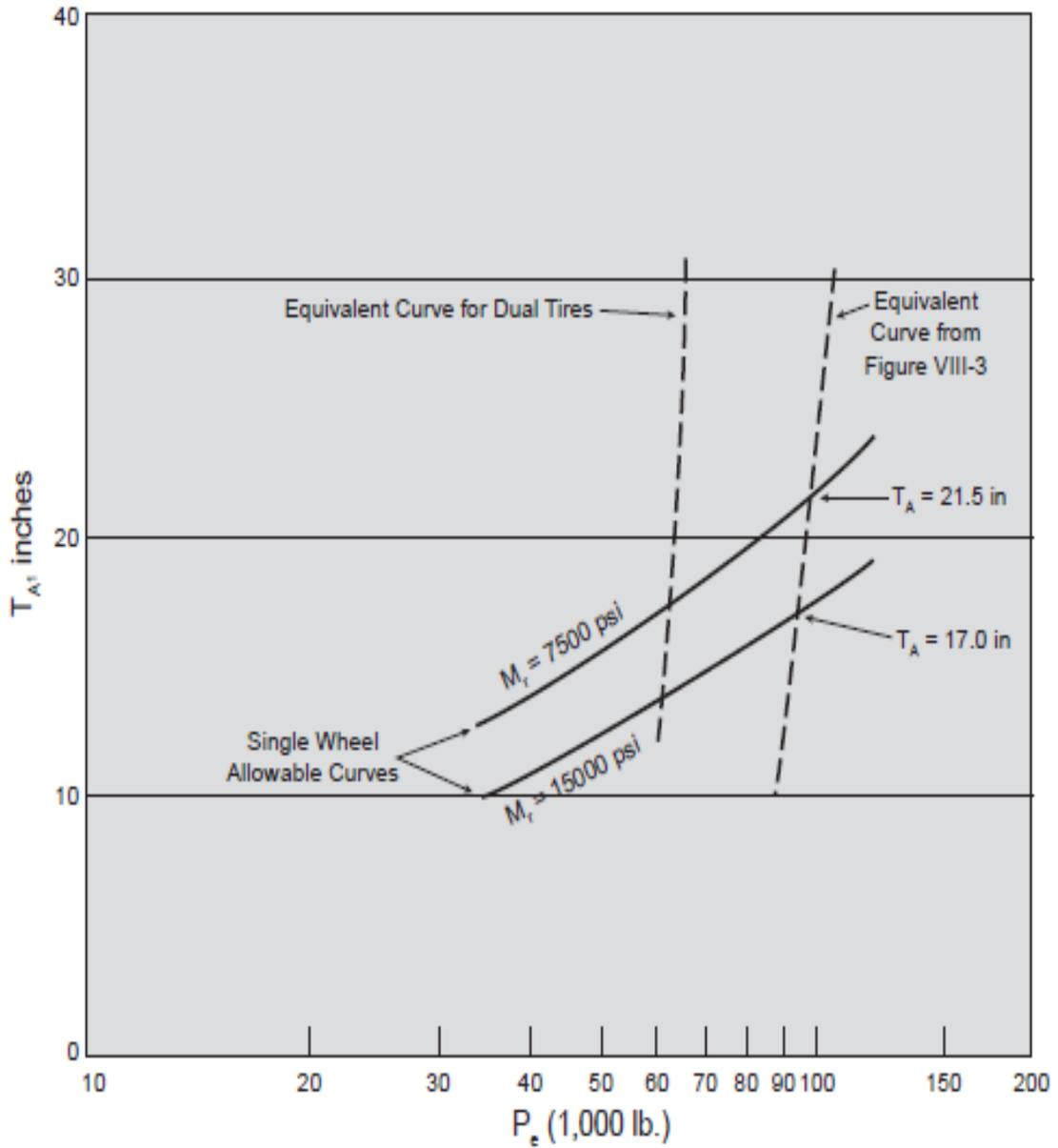
Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23)

Tabla 16. Cálculo de los valores C

Asumido T_A	Asumido P_e	$a_e = \sqrt{\frac{P_e}{p\pi}}$	$\frac{T_A}{a_e}$	F_e	$C = \sqrt{P_e F_e}$
10 in	30,000				
	60,000				
	90,000				
	120,000				
	150,000				
15 in	30,000				
	60,000				
	90,000				
	120,000				
	150,000				
22 in	30,000				
	60,000				
	90,000				
	120,000				
	150,000				
30 in	30,000				
	60,000				
	90,000				
	120,000				
	150,000				

Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23)

Figura 8 .Solución un problema de carga múltiple de ruedas



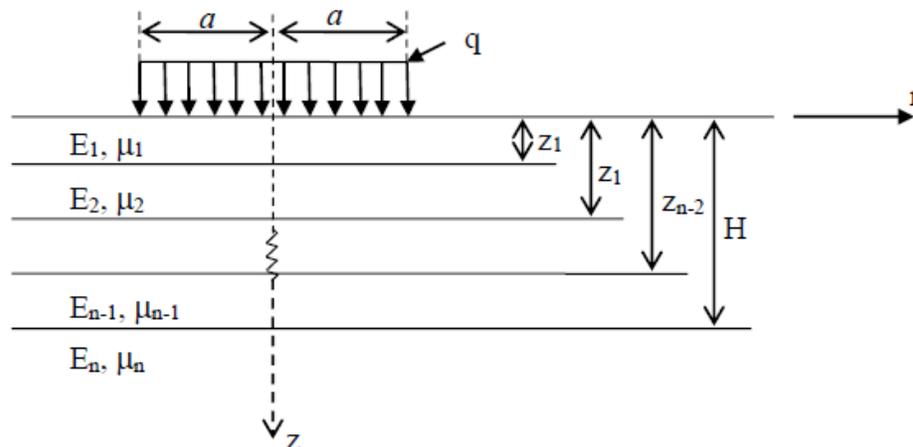
Fuente: Instituto de Asfalto. (2006). Pavimentos asfálticos de diseño de espesor para cargas pesadas de ruedas, manual, (MS-23)

2.6. Sistema multicapa elástico (software PCASE)

Con base en la conformación de los pavimentos que poseen varias capas de diferentes materiales se hace necesario considerarlos dentro de la teoría de los sistemas multicapa. Ha implicado un gran trabajo el análisis de esfuerzos y deformaciones en sistemas multicapa y la mayor parte de estos análisis incluyen las siguientes presunciones:

- Cada capa se compone de materiales que son isotrópicos, homogéneos y sin peso.
 - El sistema actúa como un sistema compuesto, es decir, existe una continuidad de los esfuerzos o deformaciones a través de las interfaces dependiendo de las presunciones que se hagan sobre el estado de las mismas.
 - La mayor parte de las soluciones asumen que los materiales son linealmente elásticos.
- La figura 9, presentan en el Apéndice B de libro “Pavement Analysis and Design” de Yang H. Huang muestra un sistema de n-capas en coordenadas cilíndricas, siendo la capa de n-ésima de espesor infinito. (Huang, Y. H. (1993)).

Figura 9. Sistema multicapa elástico



Fuente. “Pavement Analysis and Design” de Yang H. Huang

El profesor Huang presenta en su libro “Pavimet Analysis and Desing”, para un sistema multicapa elástica dos tipos de fallas en la estructura de pavimento, el agrietamiento por fatiga en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y el ahuellamiento por deformación permanente en la subrasante.

En el presente trabajo se empleará el software Pavimento-Transporte Ingeniería estructural asistida por computadora PCASE desarrollado por Transportation Systems Center & Engineering Research and Development Center of US Army Corps Engineers en el año 2010, el cual funciona bajo el sistema multicapa elástico, esta herramienta ha sido creada para diseñar pavimentos y alternativas de reparación tanto en aeródromos como en carreteras. La herramienta PCASE le brinda al ingeniero la capacidad de realizar diseños de pavimento rápidamente y, por lo tanto, la capacidad de tomar decisiones más rápido y con precisión y consistencia. PCASE también se usa para determinar la vida útil del pavimento. La información de análisis obtenida del software (pases permitidos, cargas, números de clasificación de pavimento, etc.) es crítica para ingenieros, pilotos y administradores de aeródromos. PCASE se utiliza como herramienta para la transferencia de tecnología y se actualiza continuamente para incluir las últimas investigaciones y criterios. Para ayudar aún más a los usuarios, los documentos UFC están disponibles en el escritorio.

El PCASE está compuesto por módulos que incluyen Tráfico, Diseño, Evaluación, Penetrómetro de cono dinámico (DCP), Pruebas no destructivas (NDT), Edición de vehículos, Clima e Informes principales.

2.6.1. Procedimiento de diseño

2.6.1.1. Investigación preliminar del suelo

La subrasante proporciona la base para soportar la estructura de pavimentos. La resistencia y la uniformidad de la subrasante afectarán el espesor requerido del pavimento y el desempeño del pavimento durante su vida útil de diseño. Es de una gran importancia llevar a cabo una investigación exhaustiva del subsuelo para determinar las características del suelo, la uniformidad y las condiciones de humedad.

- **Investigación del sitio**

Se deben conocer las características de los suelos subterráneos para predecir el rendimiento del pavimento. Se debe determinar la capacidad general de los suelos de subrasante en función de la clasificación del suelo, la relación humedad-densidad, el grado de compactación del suelo y las características de expansión. Factores como el agua

subterránea, la infiltración de la superficie, la capilaridad del suelo, la topografía, la lluvia y las condiciones de drenaje también afectarán el soporte futuro prestado por la subrasante al aumentar su contenido de humedad y, por lo tanto, reducirán su resistencia.

- **Exploraciones del subsuelo**

Realice exploraciones subsuperficiales para probar cada tipo de suelo identificado en el análisis preliminar del sitio. Se pueden usar pozos de prueba y perforaciones de suelo para investigaciones subterráneas. El espaciamiento de las exploraciones subterráneas a lo largo de las carreteras depende de la variabilidad de las condiciones del suelo existentes. Cuando el análisis preliminar del sitio corrobore la uniformidad del suelo, use un espacio máximo de 120 m. Realice exploraciones subsuperficiales adicionales cuando el análisis preliminar del sitio indique condiciones de subrasante inusuales o potencialmente problemáticas. Cuando las exploraciones subsuperficiales se han llevado a cabo previamente a la profundidad requerida y esas exploraciones subsuperficiales confirman la uniformidad del suelo, el espacio se puede aumentar a un máximo de 450 m siempre que los resultados de las exploraciones subsuperficiales continúen confirmando la uniformidad del suelo.

- **Penetrómetro de cono dinámico**

La prueba del penetrómetro dinámico de cono (DCP) se puede utilizar para determinar los valores de diseño de la relación de demora de California (CBR). Cuando se emplee el DCP para determinar los valores de CBR en aplicaciones de pavimento poco profundo, realice la prueba de acuerdo con INV E-172-13.

- **Clasificación del suelo**

Clasifique las muestras de suelo de las exploraciones subterráneas de acuerdo con la USCS en la norma AASHTO.

- **Evaluación del suelo**

Use las muestras de exploración del subsuelo para calcular las propiedades del suelo, preparar los perfiles del suelo y seleccionar los suelos para realizar más pruebas. Para

ayudar a identificar capas suaves en el suelo, las evaluaciones deben incluir el contenido de humedad.

- **Áreas de préstamo**

Realice exploraciones preliminares del subsuelo en áreas donde se tomará préstamo material de áreas adyacentes. Extienda las exploraciones subterráneas a una profundidad mínima de 0.6 a 1.2 m por debajo de la profundidad anticipada del préstamo. Use las muestras preliminares para clasificar los suelos, calcular el contenido de humedad y determinar las características de compactación.

2.6.1.2. Requerimientos técnicos

A continuación, se mencionan algunos aspectos técnicos a tener en cuenta para el diseño de un pavimento en una instalación militar:

- **Selección de tipo de pavimento**

Use pavimentos rígidos o pavimentos que tengan una sobrecapa rígida para las siguientes áreas:

- Áreas de mantenimiento de vehículos.
- Pavimentos para todos los vehículos con llantas que no sean de neumáticos.
- Áreas abiertas de almacenamiento con materiales que tienen cargas no neumáticas en exceso de 200 psi (1.38 MPa), cubiertas o descubiertas.
- Áreas de estacionamiento de vehículos de la organización.
- Estacionamiento de equipos de la unidad.
- Pavimentos que soportan vehículos de oruga.
- Zonas de lavado de vehículos.
- Zonas de suministro de combustible.

- **Variable de diseño**

El factor principal que influye en el diseño estructural de un pavimento es la capacidad de carga requerida. El espesor del pavimento necesario para proporcionar la capacidad de carga deseada es una función de las siguientes variables:

- Cargas brutas del vehículo y configuraciones de ruedas.
- Volumen de tráfico durante la vida de diseño del pavimento.
- Resistencia del suelo.
- Calidad de la capa de rodadura, módulo dinámico.

- **Pavimentos flexibles**

El procedimiento de diseño utilizado es el desarrollado por Departamento de Defensa (DoD) para diseñar pavimentos flexibles para carreteras y áreas de estacionamiento se conoce como el procedimiento de diseño de Criterios Beta. Este procedimiento requiere que cada capa sea lo suficientemente gruesa como para distribuir las tensiones inducidas por el tráfico de modo que cuando tales tensiones lleguen a la capa subyacente no sobrecarguen la capa subyacente causando una deformación por cizallamiento excesiva. Los Criterios Beta se utilizan para esbozar las curvas de diseño contenidas en el Manual de Diseño UFC 3-250-01, PAVEMENT DESIGN FOR ROADS AND PARKING ÁREAS (2016). Además de la determinación del grosor de las capas, se debe compactar adecuadamente cada capa para que el tráfico no induzca un asentamiento excesivo.

- **Materiales**

Los materiales para pavimentos diseñados de acuerdo con la normativa del manual de diseño de conservación vial ABC, el cual deben cumplir con los requisitos establecidos en este.

- **Sistema de drenaje**

Los sistemas de subdrenaje del pavimento deben incluirlos sobre los sistemas de drenaje superficial, sistemas de drenaje subterráneo, instalaciones de gestión de aguas pluviales,

control de erosión y sedimentos). Consultar El Manual de Drenaje para carreteras de la ABC

2.6.1.3. Condiciones del tránsito de diseño

El diseño de los pavimentos se basa en las cargas y el número total de repeticiones durante la vida útil del pavimento para los vehículos esperados. Típicamente, el tráfico se cuenta en términos tránsito promedio diario (ADT siglas en inglés y TPD en español). Este valor de TPD debe tener en consideración el tipo, el número de pasadas y la carga para cada uno de los vehículos. El TPD en la distribución diaria del tráfico se convierte en el número total de repeticiones para la vida de diseño deseada del pavimento.

- **Efecto del tráfico vehicular en el diseño del pavimento**

Se diseñará el espesor del pavimento para soportar el tráfico proyectado, categorizado por tipo y peso de vehículos, y el número de repeticiones de cada tipo para la vida de diseño del pavimento. Para la mayoría de los pavimentos, la magnitud de la carga del eje es de mayor importancia que el peso bruto de los vehículos con neumáticos debido a que el espacio entre los ejes es generalmente tan grande que hay poca interacción entre las cargas de las ruedas de un eje y las cargas de las ruedas de los otros ejes. Por lo tanto, para el caso de vehículos con neumáticos que tienen cargas axiales iguales, la mayor gravedad de la carga impuesta por los camiones convencionales de cuatro o cinco ejes en comparación con la impuesta por los camiones de dos o tres ejes es en gran medida un efecto de fatiga como resultado de un mayor número de repeticiones de carga por operación del vehículo. Para las carretillas elevadoras donde la carga se concentra en gran medida en un solo eje y para los vehículos con orugas donde la carga se divide de manera uniforme entre las dos pistas, la gravedad de la carga del vehículo es una función del peso bruto del vehículo y la frecuencia de carga. Las relaciones entre la repetición de la carga y el espesor del pavimento rígido requerido desarrollado a partir de pruebas de tráfico acelerado de pavimentos a gran escala han demostrado que, para cualquier vehículo dado, aumentar el peso bruto en tan solo un 10 por ciento puede ser equivalente a aumentar el volumen de tráfico en la misma medida. como 300 a 400 por ciento.

- **Carga equivalente de un solo eje**

El ESAL utilizado en el documento de referencia de este procedimiento Manual de Diseño UFC 3-250-01, PAVEMENT DESIGN FOR ROADS AND PARKING ÁREAS (2016), no es el ESAL calculado por la Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento. En PCASE, la equivalencia utilizada se basa en el tráfico mixto y el modelo de diseño CBR Beta. La comparación o equivalencia directa entre AASHTO y PCASE ESAL no es sencilla, ya que el cálculo de ESAL en cada metodología deriva de modelos, supuestos y procedimientos de diseño específicos. La conversión de cada vehículo a ESAL se basa en una investigación realizada por el U.S. Army Engineer Research and Development Center (USACE, ERDC, siglas en inglés).

- **Diseño de pavimento**

A menos que se especifique lo contrario en los requisitos específicos del proyecto, diseñe el pavimento según los vehículos y las cargas anticipados para una vida útil de 25 años; sin embargo, las secciones no deben ser inferiores a los mínimos indicados en UFC 3-201-01 que es de 15 cm para carpeta asfáltica en calzada y zonas de parqueo y 5 cm para carreteras o zonas de campo, el espesor de la base y subbase granular debe ser mínimo 10 cm.

El diseño de los pavimentos se basa en las cargas y el número total de repeticiones durante la vida útil del pavimento para los vehículos esperados. Típicamente, el tráfico se cuenta en términos de Tránsito Promedio Diario. Este valor debe considerar el tipo, el número de repeticiones y la carga para cada uno de los vehículos de la mezcla. El Tránsito Promedio Diario se convierte en el número total de repeticiones para la vida de diseño deseada del pavimento. Por ejemplo, si una carretera debe diseñarse para un promedio de 10 repeticiones por día de un camión de 5 ejes, el total de pases de diseño para una vida útil de 25 años será de $10 \text{ pasadas/día} \times 365 \text{ días/año} \times 25 \text{ años} = 91,250$ repeticiones totales. Cuando se diseña para una combinación de vehículos (tráfico mixto), se utiliza el concepto de un vehículo equivalente. En este procedimiento, cada vehículo se convierte en un vehículo crítico o de control, que a su vez representa el efecto acumulativo de todos los vehículos en la mezcla. Este procedimiento es el mismo procedimiento utilizado para convertir el tráfico mixto en un número equivalente de pasadas de un ESAL de doble eje

y carga doble de 18,000 lb (8,200 kg). Use la cantidad de ESAL para calcular los espesores mínimos de capa de pavimento y los requisitos de compactación.

- **Ancho de vadeo del vehículo**

A medida que los vehículos viajan por una carretera, existe una tendencia natural a que los vehículos vaguen de lado a lado. Este desplazamiento lateral determina el número real de repeticiones de carga o tensión aplicadas a un punto dado en el pavimento. Este efecto se tiene en cuenta en el diseño del pavimento por el ancho de desplazamiento, que se define como el ancho total del pavimento sobre el cual la línea central de un vehículo se distribuye el 75 por ciento del tiempo simétricamente alrededor de la media. Los estudios de tráfico han indicado que el ancho de recorrido de las carreteras es de aproximadamente 850 mm suponiendo una distribución estadística normal del tráfico. Esto significa que un vehículo se desviaría lateralmente de su línea central una distancia máxima de 420 mm desde su línea de recorrido.

- **Ubicación de cargas críticas**

En carreteras con carriles de 4 m de ancho, la ubicación donde se aplican las cargas máximas es de aproximadamente 0 a 1 m desde el borde del pavimento. Si no se proporcionan mecanismos para transferir la carga del neumático a los hombros adyacentes, se produce una condición de transferencia de carga cero en el borde del pavimento. Esto tiene un impacto marcado en las tensiones a las que se someterá una losa de concreto. En pavimentos flexibles, el concepto de daño acumulativo asociado con cada vehículo se utiliza para dar cuenta del desplazamiento lateral y la tensión vertical aplicada a la subrasante.

- **Tráfico mixto**

Para el procedimiento de tráfico mixto realiza una equivalencia entre vehículos calculando los requisitos de espesor de cada vehículo para el número especificado de repeticiones y CBR de subrasante. El vehículo con el mayor grosor requerido se convierte en el vehículo de control y los otros vehículos convertidos a él. Los cálculos se basan en los requisitos de espesor de cada vehículo individual; por lo tanto, el vehículo de control resultante para pavimentos flexibles y rígidos puede ser diferente. Dado que las condiciones de subrasante

pueden variar a lo largo de una carretera, los cálculos de tráfico mixto utilizan una categoría de resistencia de subrasante representativa en lugar de un valor específico. Estas categorías de subrasante representativas se muestran en la siguiente tabla. Sin embargo, cuando la equivalencia final de tráfico mixto se haya terminado en términos de las repeticiones equivalentes del vehículo de control, el valor de CBR o k de diseño se utilizará para obtener el espesor de pavimento requerido por encima de la subrasante.

Tabla 17. Categorías Representativas de Subrasante

Categoría Subrasante	Rango CBR Pavimento flexible	Valor representativo CBR
A	$CBR \geq 13$	15
B	$8 < CBR \leq 13$	10
C	$4 < CBR \leq 8$	6
D	$CBR \leq 4$	3

Fuente: UFC 3-250-01 Pavement Design for Roads and Parking Areas.

2.6.1.4. Subrasante para pavimentos flexibles

Se deben tener en cuenta los siguientes factores con respecto a las subrasantes para un diseño de pavimento flexible:

- Las características generales de los suelos de subrasante (clasificación del suelo, límites).
- Profundidad al sustrato rocoso.
- Profundidad hasta la capa freática.
- La compactación alcanzable en la subrasante y la adecuación de la densidad existente en las capas debajo de los requisitos de la zona de compactación.
- El CBR que la subrasante compactada y la subrasante sin compactar tendrán en las
- condiciones ambientales locales.
- La presencia de capas suaves y débiles en el subsuelo.
- Susceptibilidad a la acción perjudicial de las heladas.
- Potencial de expansión
- **Selección de valores de diseño CBR**

Los pavimentos flexibles pueden diseñarse utilizando el CBR sumergido de laboratorio, el CBR en el campo, el CBR obtenido a partir del Penetrómetro de Cono Dinámico o el

CBR de muestras inalteradas. Para el diseño de pavimentos flexibles en áreas donde no se dispone de experiencia previa con respecto al rendimiento del pavimento, normalmente se utiliza el CBR sumergido en laboratorio. Cuando un pavimento existente está disponible en el sitio que tiene una subrasante construida con los mismos estándares que el trabajo que se está diseñando, se pueden usar pruebas in situ o pruebas en muestras no alteradas para seleccionar el valor de CBR de diseño.

Las pruebas in situ se utilizan cuando el material de la subrasante tiene el contenido máximo de humedad. Por el contrario, se usan pruebas en muestras no perturbadas donde el material no tiene el contenido máximo de agua y, por lo tanto, se requiere sumergirlo. El muestreo implica mucho más trabajo que las pruebas in situ y las muestras no perturbadas tienden a ser ligeramente perturbadas. Por lo tanto, las pruebas en el lugar deben usarse siempre que sea posible.

2.6.1.5. Subbases granulares para pavimentos flexible

La capa de subrasante considera materiales cuyo valor de CBR de diseño es igual o inferiores a 20; las subbases son aquellas con valores de CBR superiores a 20. Se han establecido espesores mínimos de pavimento y base para eliminar la necesidad de subbases con valores de CBR de diseño superiores a 50. Cuando el valor de CBR de diseño de la subrasante sin procesamiento está en el rango de 20 a 50, Es posible que no se necesiten materiales y subbases seleccionados. Sin embargo, a la subrasante no se le pueden asignar valores de diseño CBR de 20 o más a menos que cumpla con los requisitos de gradación y plasticidad para las subbases, se aplica las consideraciones del artículo 320-13 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías.

- **Materiales**

Los materiales de la subbase para cada valor de CBR deben cumplir con los requisitos de calidad y gradación dados en las especificaciones para que desarrollen las fortalezas necesarias. Los materiales seleccionados son normalmente suelos de grano grueso disponibles localmente (grava: GW, GP, GM, GC o arena: SW, SP, SM, SC), aunque en ciertos casos se pueden usar suelos de grano fino en los grupos ML y CL.

- **Selección de valores de diseño CBR**

Durante la fase de diseño donde los materiales normalmente no han sido seleccionados para la construcción, los valores de CBR de diseño deben seleccionarse en función de las gradaciones recomendadas en la Tabla 9 y el costo de los materiales disponibles. El material seleccionado o subbase generalmente es uniforme, y el problema de seleccionar una condición limitante, como se describe para la subrasante, normalmente no existe. Las pruebas generalmente se realizan en muestras remodeladas; sin embargo, cuando exista una construcción similar disponible, se pueden realizar pruebas de CBR en el material cuando haya alcanzado su contenido máximo de agua esperado o en muestras sumergidas sin perturbar.

Los procedimientos para seleccionar valores de diseño de CBR descritos para subrasantes se aplican a materiales y subbases seleccionados. Las pruebas de CBR en materiales de grava en el laboratorio tienden a dar valores de CBR más altos que los obtenidos en el campo. La diferencia se atribuye al procesamiento necesario para analizar la muestra en el molde de 6 pulgadas (150 mm) y al efecto de confinamiento del molde. Por lo tanto, la prueba CBR se complementa con gradación y Atterberg limita los requisitos para las subbases.

2.6.1.6. Bases granulares para pavimentos flexible

- **Materiales**

Utilice materiales de alta calidad en cursos básicos de pavimentos flexibles. Estos materiales de alta calidad proporcionan resistencia a los altos esfuerzos que ocurren cerca de la superficie del pavimento. Las especificaciones de guía para agregado triturado graduado, y agregado estabilizado corresponden a las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías artículo 330-13. (Corps of Engineers, United States of América, 2016)

- Espesor mínimo 100 mm

CAPÍTULO III
APLICACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO
DE PAVIMENTOS PARA TRÁFICO MILITAR

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS PARA TRÁFICO MILITAR

En este capítulo se presenta la caracterización de los materiales, los procedimientos y los resultados obtenidos para el diseño de espesores de pavimentos asfálticos para vehículos militares destinados al uso en batallones.

Se realizará el diseño para vehículos militares actuales en el BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ, el cual cuenta con vehículo militar tipo de transporte de personal, y diseñaremos para un hipotético caso que los vehículos militares blindados de La paz, lleguen al BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ, para alguna actividad militar correspondiente.

Iniciando por la recopilación de información donde se efectuó la identificación del tipo de vehículos que existe en la actualidad en los batallones y sus principales características, algunos de estos vehículos tienen masas brutas (pesos) superiores a 10,000 kilogramos. Muchos tienen cargas de ruedas y características de espaciamiento de las ruedas particulares para estos vehículos.

3.1. Ubicación y localización del proyecto

La zona de estudio para la extracción de las muestras, se obtuvo de la instalación militar del ejército “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ” localizada en el departamento de Tarija (Bolivia) provincia Cercado, el cual se tomaron muestras de suelo natural de tres puntos estratégicos dentro de la instalación militar, considerados de acuerdo al área de transitabilidad de los vehículos dentro del batallón y a si mismo por motivos internos, se realizaron 3 puntos como máximo para la extracción de las muestras el cual estos puntos son (entrada, estacionamiento y circulación).

Figura 10. Ubicación del lugar de estudio



Fuente: Google earth

3.2. Muestreo de materiales

Para la selección de la muestra de los suelos fue necesario hacer un previo reconocimiento del área y sus aptitudes geotécnicas. Las muestras se extrajeron cumpliendo con las especificaciones y siguiendo los pasos de las guías de laboratorio.

Para los diferentes muestreos se procedió a cavar con el pico unos 80 a 90 cm para sacar el suelo superficial el cual se eliminó debido a que presente posibles impurezas, luego se sacó la muestra requerida para el estudio. Una pequeña muestra se colocó en bolsa de nylon para evitar que pierda la humedad natural del suelo, las demás muestras se colocaron en sacos de plásticos para la realización de los respectivos ensayos en laboratorio.

Muestra 1: Subrasante Entrada

El primer suelo subrasante que se extrajo dentro de la instalación militar, geográficamente se encuentra 322153.00 m E y 7616354.00 m S. Prog: 0+000.

Figura 11. Muestra zona 1 de estudio



Fuente: Elaboración propia

Muestra 2: Subrasante Estacionamiento

El segundo suelo subrasante se extrajo dentro la instalación militar, geográficamente se encuentra 322146.18 m E y 7616186.90 m S. Prog: 0+168.

Figura 12. Muestra zona 2 de estudio



Fuente: Elaboración propia

Muestra 3: Subrasante Circulación

El tercer suelo subrasante que se extrajo dentro de la instalación militar, geográficamente se encuentra 322091.00 m E y 7616320.00 m S. Prog:0+070.

Figura 13. Muestra zona 3 de estudio



Fuente: Elaboración propia

3.3. Caracterización de los materiales

Para conocer las propiedades de los suelos utilizados en el proyecto, se tomaron muestras en todo el desarrollo del mismo, posteriormente en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, se determinaron sus propiedades y clasificación de los mismos según la norma AASHTO. Los resultados se muestran en la siguiente tabla que corresponden a cada uno de las zonas de estudio. Las planillas de ensayos de caracterización se presentan en el ANEXO C.

Tabla 18. Resumen de la caracterización de materiales

		S. Subrasante 1	S. Subrasante 2	S. Subrasante 3
Contenido de humedad		1,87	6,03	1,76
Limites	Líquido	0,00	27,24	0,00
	Plástico	0,00	19,22	0,00
	Índice de plasticidad	0,00	8,02	0,00
	Índice de grupo	0,00	8,00	0,00
Granulometría	% Pasa N° 4	100,00	100,00	100,00
	% Pasa N° 10	97,93	99,56	99,50
	% Pasa N° 40	96,32	99,14	98,75
	% Pasa N° 200	51,70	92,08	50,86
Compactación	Densidad máxima	2,09	2,04	2,05
	Humedad optima	9,38	12,14	10,81
CBR (95%)		10,00	6,00	3,00
Tipo de suelo				
AASHTO		A-4 ₍₀₎	A-4 ₍₆₎	A-4 ₍₀₎
SUCS		ML	CL	ML

Fuente: Elaboración propia

3.4. Recopilación de información.

Se recopiló la información relacionada con los tipos de vehículos utilizados en las instalaciones militares del ejército de Bolivia, ya que es común la operación de vehículos militares pesados en superficies pavimentadas para reducir los costos de combustible, costos de mantenimiento, aumentar la velocidad, la eficiencia y la seguridad de las operaciones de los vehículos. Esta información se obtuvo con la colaboración de los batallones mecanizados. En la figura titulada “Vehículos militares destinados para batallones en Bolivia”, se presenta el resumen de los vehículos que en la actualidad existen en el “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ” y en todo el ejército de Bolivia, para cada tipo de vehículo se presenta las siguientes características: Nombre del Vehículo, Velocidad en km/hr, Autonomía en kilómetros, Peso en Kilogramos vacío y en combate, Dimensiones principales como son largo, ancho y alto, La empresa fabricante.

Tabla 19. Vehículos militares destinados para batallones de Bolivia (N. 1- 4)

N°	TIPO DE BLINDADO	Velocidad (km/h)	Autonomía (km)	Peso (kg)		Tamaño		Fabricante
				Vacío:	Combate:	Largo:	Ancho:	
1	EE-09 CASCABEL 	100	880	Vacío:	10900	Largo:	6,04 m	ENGESA Engenheiros Especializados S/A
				Combate:	13400	Alto:	2,6 m	
						Ancho:	2,6 m	
2	EE-11 URUTU 	105	750	Vacío:	11000	Largo:	6,15 m	ENGESA Engenheiros Especializados S/A
				Combate:	14000	Alto:	2,12 m	
						Ancho:	2,65 m	
3	M-113 	67,6	480	Vacío:	12000	Largo:	4,86 m	FOOD MACHINERY CORP
				Combate:	12880	Alto:	2,5 m	
						Ancho:	2,68 m	
4	SK-105 KURASSIER 	68	520	Vacío:	17450	Largo:	7,76 m	SAURER WERK
				Combate:	17700	Alto:	2,88 m	
						Ancho:	2,5 m	

Tabla 20. Vehículos militares destinados para batallones en Bolivia (N. 5 - 9)

5	<p>MOWAG ROLAND</p> 	100	750	Vacío:	4400	Largo:	4,73 m	MOWAG
				Combate:	6200	Alto:	2,1 m	
						Ancho:	2,05 m	
6	<p>V-100 (M706)</p> 	100	643	Vacío:	9888	Largo:	5,69 m	CADILLAC GAGE
				Combate:	10315	Alto:	2,54 m	
						Ancho:	2,26 m	
7	<p>M-998 HMMWV HUMVEE</p> 			Vacío:	2340	Largo:	4,6 m	AM GENERAL
				Combate:	3600	Alto:	1,8 m	
						Ancho:	2,1 m	
8	<p>SAURER 4K-4FA</p> 	63	370	Vacío:	12700	Largo:	5,4 m	Österreichische Saurerwerke
				Combate:	15000	Alto:	2,1 m	
						Ancho:	2,5 m	
9	<p>M35A2</p> 	93	600	Vacío:	9000	Largo:	6,98 m	REO, KAISER, STUDEBAKER, AM GENERAL, KIA Y SSANGYONG
				Combate:	10500	Alto:	2,82 m	
						Ancho:	2,36 m	

Tabla 21. Vehículos militares destinados para batallones en Bolivia (N. 10 – 11)

10	 <p>DONGFENG EQ240/EQ2081</p>	87	400	Vacío:	5090	Largo:	6,53 m	DONGFENG MOTOR CORPORATION
				Combate:	8800	Alto:	2,4 m	
						Ancho:	2,39 m	
11	 <p>FAW Jiefang CA1122J</p>	96		Vacío:	11340	Largo:	7,31 m	China First Automobile Group Corporation
				Combate:	13608	Alto:	2,71 m	
						Ancho:	2,49 m	

Fuente: Elaboración propia

3.5. Selección del método de diseño

Para la selección del método se tuvo en cuenta tres aspectos, el primero es que el modelo sea tradicional y de gran empleo en pavimentos convencionales, se seleccionó el método AASHTO (1993), el segundo aspecto asociado a cargas elevadas que los vehículos militares poseen y las cuales pueden llegar a ser superiores a las establecidos en las metodologías tradicionales, se seleccionó el manual de diseño de pavimentos para cargas pesadas Manual MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads” y por último se buscó un método o una herramienta que tuviera en cuenta las variables específicas del diseño y se encontró que el software Pavimento-Transporte Ingeniería estructural asistida por computadora PCASE considera la configuración y cargas específicas de los vehículos militares.

Tabla 22. Estructuras de pavimentos a calcular

Tipo de tránsito	Rodadura	Cargas	Método a emplear	Radio de carga
Vehículo Militar Tipo	Neumático	Una carga Tipo	AASHTO 93 Manual MS-23 PCASE	C y D
Vehículos Militares	Neumáticos y orugas	Repeticiones de carga	PCASE	D
Vehículo de carga	Neumático	Repeticiones de carga	AASHTO 93	C

D= Área por defecto, rectangulares bordes redondeado C= Circular

Fuente: Elaboración propia

3.6. Definición de la variable tránsito

Según U.S. Army Engineer Research and Development. El ESAL en cada metodología deriva de modelos, supuestos y procedimientos de diseño específicos. La conversión de cada vehículo a ESAL se basa en una investigación realizada por el U.S. Army Engineer Research and Development Center (USACE, ERDC, siglas en inglés).

Para la estimación del tránsito equivalente, se implementó la metodología exigida por el manual de diseño UFC 3-250-01, PAVEMENT DESIGN FOR ROADS AND PARKING ÁREAS (2016), el diseño de los pavimentos se basa en las cargas y el número total de repeticiones durante la vida útil del pavimento para los vehículos esperados. Típicamente, el tráfico se cuenta en términos de Tránsito Promedio Diario (TPD). Este valor debe considerar el tipo, el número de repeticiones y la carga para cada uno de los vehículos de la mezcla. El Tránsito Promedio Diario se convierte en el número total de repeticiones para la vida de diseño deseada del pavimento.

Se investigó sobre el número de vehículos militares que pueden ser asignados a una unidad militar, pero por seguridad Nacional esta información no es suministrada, además es variable dependiendo de las condiciones de orden público del país. Por tanto, se adoptan las siguientes condiciones en función a los vehículos militares existentes en el “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ” y en las demás instalaciones del ejército de Bolivia. A sí mismo en el ANEXO B, se presenta los cálculos de las variables para el cálculo de nuestras estructuras.

Tabla 23. Tránsito para las condiciones de análisis

Tipo de tránsito	Tipo de vehículo	Cargas	# Repeticiones calculadas	# Repeticiones adoptadas
Vehículo Militar Tipo	FAW Jiefang CA1122J	Una carga tipo Neumático	73.000	73.000
Vehículos Militares	FAW Jiefang CA1122J, EE-11 URUTU, SK-105 KURASSIER	Repeticiones de carga	73.000 54.750 36.500	73.000 55.000 37.000
Vehículo de carga	LOWBOY	Repeticiones de carga	54.750	55.000

Fuente: Elaboración propia

3.7. Vehículo Militar Tipo

Se efectúa el diseño considerando un vehículo tipo, el de mayor frecuencia o el de mayor carga en el “BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”, en este caso se ha tomado, FAW Jiefang CA1122J, el cual es un camión de transporte de personal con un peso máximo para combate de 13,61 toneladas, se efectúan para este vehículo de diseño por el método Aashto 93, manual MS-23 y por el software PCASE.

Figura 14. Vehículo Militar Tipo

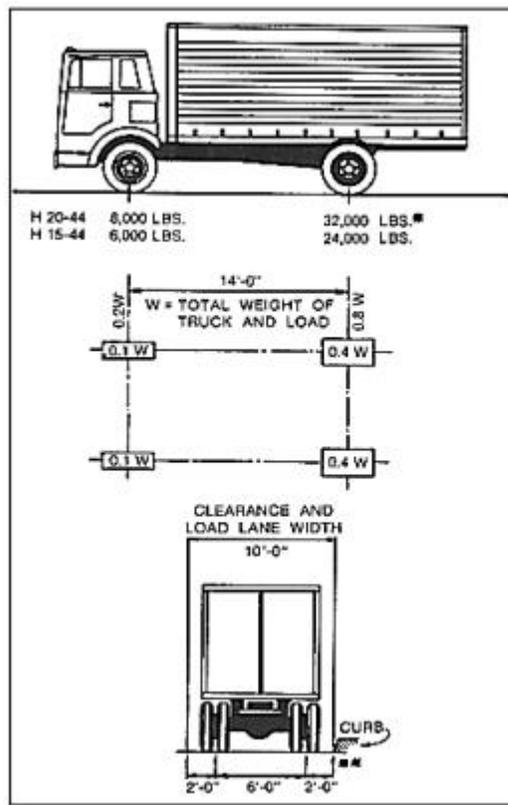


Fuente: Elaboración propia

3.7.1. Aashto 93

El vehículo de diseño es un FAW Jiefang CA1122J corresponde a un vehículo H15-44 según la norma AASHTO Standard. Donde H15 se refiere a camiones de 2 ejes para carreteras y el número 44 el año que se adoptó el camión como referencia, el cual tiene las siguientes características.

Figura 15. Modelo de camión H15 y H20



Fuente: AASHTO Standard, 2002

Cálculo del tránsito equivalente 8,2 ton, para el vehículo militar tipo.

El número de repeticiones del vehículo de diseño es de 73.000, el cálculo de este valor se presenta en el ANEXO B, así mismo todos los parámetros para el cálculo por el método de la AASHTO 93.

El número de ejes equivalentes de 8,2 ton se obtiene multiplicando el número de repeticiones por el factor de camión = $73.000 \times 1,55 = 113.150$ ESAL's (8,2 Ton).

Se determinarán los espesores para dos tipos de subrasante: Mr 4.500 psi, para un CBR de 3% y Mr 9.000 psi, para un CBR 6%.

Figura 16. Diseño método AASHTO 93. CBR 3%

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: Flexible Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 80% Zr = -0.841

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial [] PSI final [2]

Tránsito de diseño: W18 [3150]

Sergio Gudiño Sandoval (1995.gudino@gmail.com) está conectado

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	435000	¿E/a?	0.440	1	¿m?	1.31	2.98 3.0 3.0 1.32
2	28000	¿E/a?	0.131	1	¿m?	1.80	3.66 4.0 4.0 0.52
3	13000	¿E/a?	0.093	1	¿m?	2.67	8.88 9.0 9.0 0.84
4	4500	MR					2.68 OK 1.18E+005

W18 real: 1.18E+005

Cálculo de W18 para un SN

SN [] W18 []

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Diseño método AASHTO 93. CBR 6%

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: Flexible Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 80% Zr = -0.841

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial [4.2] PSI final [2]

Tránsito de diseño: W18 [113150]

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1	435000	¿E/a?	0.440	1	¿m?	1.31	2.98 3.0 3.0 1.32
2	28000	¿E/a?	0.131	1	¿m?	1.80	3.66 4.0 4.0 0.52
3	13000	¿E/a?	0.093	1	¿m?	2.07	2.43 2.5 6.0 0.56
4	9000	MR					2.40 OK 2.91E+005

W18 real: 2.91E+005

Cálculo de W18 para un SN

SN [] W18 []

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Manual MS-23

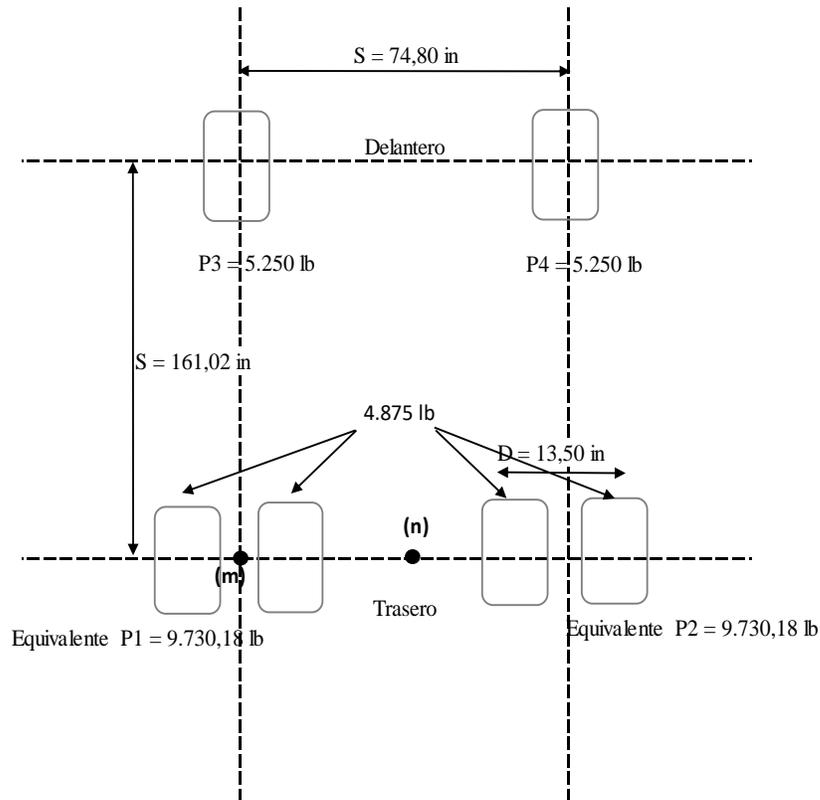
Según el vehículo militar tipo FAW Jiefang CA1122J, corresponde a carga de ruedas múltiples, la cual conforman por 2 eje. Cada rueda individual trasera se carga 4.875 lb. Las ruedas delanteras se cargan 5.250 lb cada una. Se esperan repeticiones de carga aproximadamente 73.000, la temperatura diaria promedio es de 59 °F. Deben investigarse dos condiciones de subrasante: $M_r = 4.500$ psi y $M_r = 9.000$ psi. Se han seleccionado dos puntos de cálculo, estos se identifican como (m), (n), en la tabla 25. Las distancias de desplazamiento radial de los puntos (m), (n) a las ruedas se enumeran a continuación:

Tabla 24. Puntos de diseño computados para el análisis de tensiones verticales

Desde el punto de cálculo	Distancias de compensación radial al neumático No			
	1	2	3	4
(m)	0,00 in	74,80 in	161,02 in	177,55 in
(n)	37,40 in	37,40 in	165,31 in	165,31 in

Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Carga múltiple de ruedas



Fuente: Elaboración propia

Se siguieron los siguientes pasos para el diseño:

1. Se prepararon curvas admisibles de T_A frente a P para la condición de subrasante.
2. Las dos ruedas traseras fueron reemplazadas, para fines de análisis, con ruedas individuales equivalentes.
3. El procedimiento descrito es utilizando la carga de una sola rueda equivalente para las ruedas traseras y las cargas reales de las ruedas delanteras.

Datos de neumáticos. Los neumáticos se designan como 9.00R20, que cuando se cargan a 5.250 lb, tienen aproximadamente las siguientes características:

Carga de una sola rueda, $P = 5.250$ lb.

Presión de contacto de los neumáticos, $p = 80$ psi.

Numero de repeticiones de carga = 73.000

Área bruta de contacto, $A = 5.250 / 80 = 65,63$ sq

Temperatura de, $T = 59$ °F

Radio de contacto,

$$a = \sqrt{\frac{5.250}{80 * \pi}} = 4,57 \text{ in}$$

Relación permisible T_A versus p , de la Tabla 12. Cuadro II. Diseño T_A/a Valores para el promedio anual diario Temperatura diaria anual superior a 13° C (55° F), T_A/a para $p = 80$ psi y M_r se determina de la siguiente manera:

Para $M_r = 4.500$ psi, entonces $T_A/a = 1,52$

Para $M_r = 9.000$ psi, entonces $T_A/a = 1,33$

Para construir la curva, T_A se calculó para un rango de valores de carga (P). Tabla:

Tabla 25. Rango de valores de carga (P)

P Lb	a ^① in	T _A ^②	T _A ^②
		Mr = 4.500 psi	Mr = 9.000 psi
5.250	4,57	6,95	6,08
10.500	6,45	9,82	8,60
15.750	7,92	12,03	10,53
21.000	9,14	13,89	12,16

Fuente: Elaboración propia

$$\textcircled{1} \quad a = \sqrt{\frac{P}{p \cdot \pi}}$$

$$\textcircled{2} \quad T_A = a \cdot (T_A/a)$$

La curva de T_A permitidas necesarias se muestran en la Figura 19:

Carga equivalente de una rueda para neumáticos traseros. - Para simplificar la solución a este problema, cada juego de neumáticos traseros fue reemplazado por un neumático individual equivalente (carga de ruedas). Los siguientes pasos muestran el procedimiento.

Se requieren las siguientes determinaciones:

$$D = 13,5 \text{ in}$$

$$D / a = 13,50 / 4,57 = 2,95$$

Pe = carga de rueda única equivalente

Para determinar Pe, se realiza una gráfica de los valores de Pe versus T_A en la Figura 20.

Los valores de Pe versus T_A se determinan a partir de la Figura 5 de la siguiente manera:

Tabla 26. Datos de valores Pe versus TA a partir de los factores de carga de rueda doble

a	T_A/a	L	Pe = $\frac{2 * P}{L}$	T_A
4,57	1	1,18	8.898,31	4,57
	1,5	1,12	9.459,46	6,86
	2	1,08	9.722,22	9,14
	2,5	1,06	9.905,66	11,43

Fuente: Elaboración propia

Las cargas equivalentes de una sola rueda se pueden determinar a partir de la figura 20 a partir de la intersección de las curvas de T_A permitidas y la curva Pe versus T_A. Este valor es:

$$Mr = 4.500 \text{ psi} \quad Pe = 9.730,18 \text{ lb}$$

$$Mr = 9.000 \text{ psi} \quad Pe = 9.611,73 \text{ lb}$$

Para reducir la cantidad de trabajo en los pasos restantes del procedimiento, se adopta un valor de Pe = 9.730,18 lb para ambos problemas de Mr.

Carga equivalente de una rueda para la configuración de cuatro ruedas. - La fase final del procedimiento de solución implica la determinación de una carga de rueda única equivalente para la configuración de cuatro ruedas que se muestra en la figura 18. Esta configuración consiste en dos ruedas delanteras de 5.250 libras y dos ruedas traseras de 9.750 libras (equivalentes a dos ruedas que tienen una carga bruta de 9.730,18 libras).

Las distancias de desplazamiento entre la rueda y los puntos de cálculo se dieron antes.

Los valores de radios cargados (a) se calculan a continuación:

Rueda delantera:

$$a = \sqrt{\frac{5.250}{80 * \pi}} = 4,57 \text{ in}$$

Rueda trasera:

$$a = \sqrt{\frac{9.747,03}{80 * \pi}} = 6,23 \text{ in}$$

Estos valores se enumeran en las tres tablas posteriores, donde se calculan valores C y Pe.

Tabla 27. Valores C y Pe - 1.

T _A	Punto de computación		Número de llanta				Σ√P F	Pe
			1	2	3	4		
in		P (lb.)	9747,03	9747,03	5250,00	5250,00		
		a (in)	6,23	6,23	4,57	4,57		
		p (psi)	80,00	80,00	80,00	80,00		
5,00	m	r	0.00	74.80	161.02	177.55		
		T _A /a	0.80	0.80	1.09	1.09		
		r/a	0.00	12.02	35.23	38.85		
		F	0.65	0.069	0.05	0.05		
		√P F	64	7	4	4	78	13053
	n	r	37.40	37.40	165.31	165.31		
		T _A /a	0.80	0.80	1.09	1.09		
		r/a	6.01	6.01	36.17	36.17		
		F	0.17	0.17	0.05	0.05		
		√P F	17	17	4	4	41	
9,00	m	r	0.00	74.80	161.02	177.55		
		T _A /a	1.45	1.45	1.97	1.97		
		r/a	0.00	12.02	35.23	38.85		
		F	0.44	0.069	0.05	0.05		
		√P F	43	7	4	4	58	14889
	n	r	37.40	37.40	165.31	165.31		
		T _A /a	1.28	1.28	1.75	1.75		
		r/a	6.01	6.01	36.17	36.17		
		F	0.17	0.17	0.05	0.05		
		√P F	17	17	4	4	41	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Valores C y Pe - 2.

T _A	Punto de computación		Numero de llanta				Σ √P F	Pe
			1	2	3	4		
		P (lb)	9730.18	9730.18	5250.00	5250.00		
		a (in)	6.22	6.22	4.57	4.57		
		p (psi)	80.00	80.00	80.00	80.00		
13,00	m	r	0.00	74.80	161.02	177.55		
		T _A /a	2.09	2.09	2.84	2.84		
		r/a	0.00	12.02	35.23	38.85		
		F	0.30	0.07	0.05	0.05		
		√PF	30	7	4	4	44	16267
	n	r	37.40	37.40	165.31	165.31		
		T _A /a	2.09	2.09	2.84	2.84		
		r/a	6.01	6.01	36.17	36.17		
		F	0.16	0.16	0.05	0.05		
		√PF	16	16	4	4	39	
17,00	m	r	0.00	74.80	161.02	177.55		
		T _A /a	2.73	2.73	3.72	3.72		
		r/a	0.00	12.02	35.23	38.85		
		F	0.22	0.07	0.05	0.05		
		√PF	22	7	4	4	36	16800
	n	r	37.40	37.40	165.31	165.31		
		T _A /a	2.57	2.57	3.50	3.50		
		r/a	6.01	6.01	36.17	36.17		
		F	0.14	0.14	0.05	0.05		
		√PF	14	14	4	4	35	

Fuente: Elaboración propia

Al resolver problemas de este tipo, en los cuales las ruedas traseras son considerablemente más pesadas que las ruedas delanteras, a menudo se supone que la tensión máxima ocurrirá en el punto de cálculo (m) o (n). Las tablas 27 y 28 se utiliza en la siguiente parte del procedimiento para calcular los valores de C que es el valor máximo de $\sum \sqrt{P F}$ para cada valor supuesto de T_A. Las tablas 27 y 28 son básicamente una forma de cálculo y los cálculos son relativamente sencillos. Sin embargo, los valores de F, factores de deflexión de la interfaz, deben leerse en la figura 6.

Los valores de C se calculan para los valores asumidos de Pe que se muestran en la tabla 29. Estos valores de C y Pe, para cada valor supuesto de T_A, se representan como se muestra en la figura 19. Luego, los valores de Pe se determinan a partir de la figura 19.

para cada uno de los cuatro valores máximos de $\Sigma \sqrt{P F}$ determinado en la tabla 27 y 28 y se registran en la última columna de esa tabla.

Tabla 29. Cálculo de los valores C

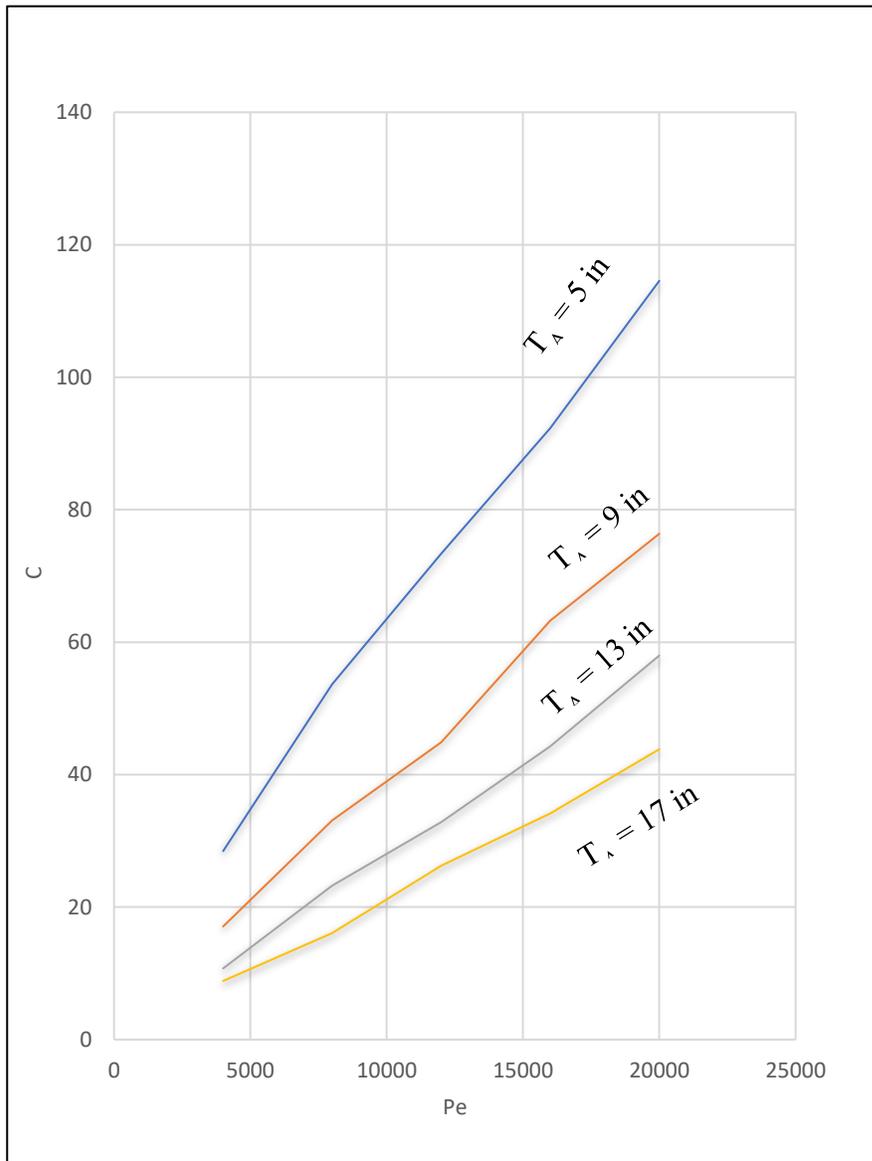
Asumido TA	Asumido Pe	$a_e = \sqrt{\frac{P_e}{\rho\pi}}$	$\frac{T_A}{a_e}$	Fe	$C = \sqrt{P_e F_e}$
5	4000	3.989	1.25	0.45	28
	8000	5.64	0.89	0.60	54
	12000	6.91	0.72	0.67	73
	16000	7.98	0.63	0.73	92
	20000	8.92	0.56	0.81	115
9	4000	3.989	2.26	0.27	17
	8000	5.64	1.60	0.37	33
	12000	6.91	1.30	0.41	45
	16000	7.98	1.13	0.50	63
	20000	8.92	1.01	0.54	76
13	4000	3.99	3.26	0.17	11
	8000	5.64	2.30	0.26	23
	12000	6.91	1.88	0.30	33
	16000	7.98	1.63	0.35	44
	20000	8.92	1.46	0.41	58
17	4000	3.99	4.26	0.14	9
	8000	5.64	3.01	0.18	16
	12000	6.91	2.46	0.24	26
	16000	7.98	2.13	0.27	34
	20000	8.92	1.91	0.31	44

Fuente: Elaboración propia

Estos valores son:

TA	C	Pe
5	78	13053
9	58	14889
13	44	16267
17	36	16800

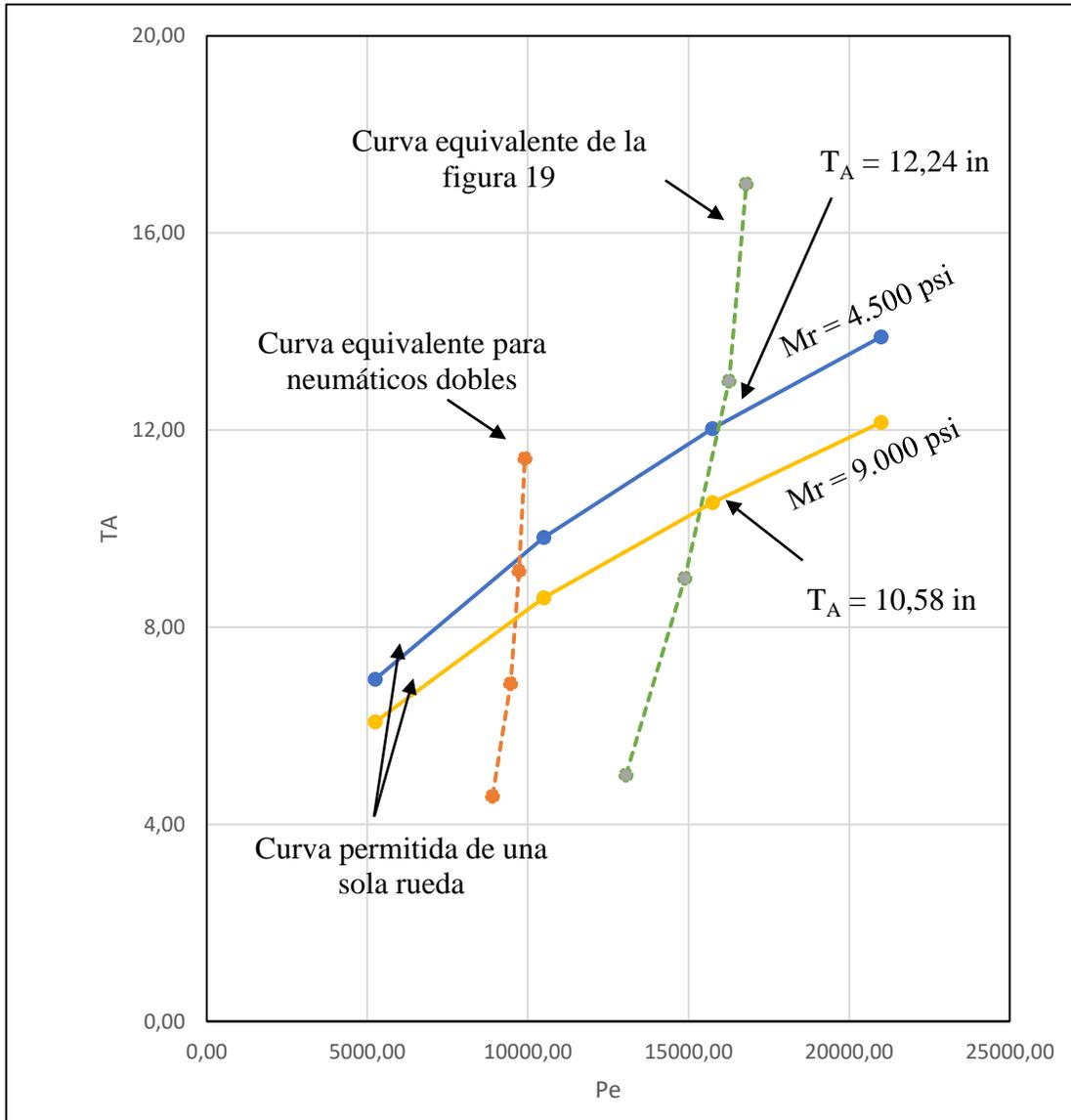
Figura 19. Relación entre Pe y C para diferentes valores de TA



Fuente: Elaboración propia

Los valores de T_A frente a Pe , indicados anteriormente, se representan en la figura 20 para determinar los espesores finales de diseño.

Figura 20. Solución a un problema de carga múltiple de ruedas



Fuente: Elaboración propia

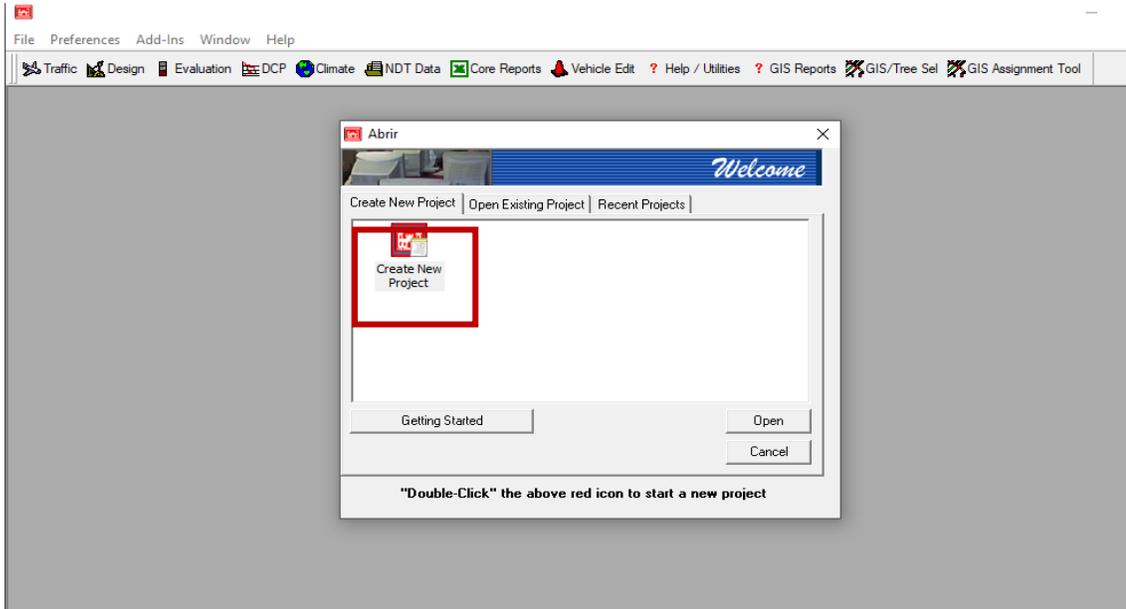
Se obtuvo la siguiente solución:

<u>Mr</u>	<u>T_A</u>
4.500 psi	12,24 in
9.000 psi	10,58 in

3.7.3. Software PCASE

A continuación, se presenta el desarrollo del ejercicio mediante el software PCASE, primero se crea el proyecto.

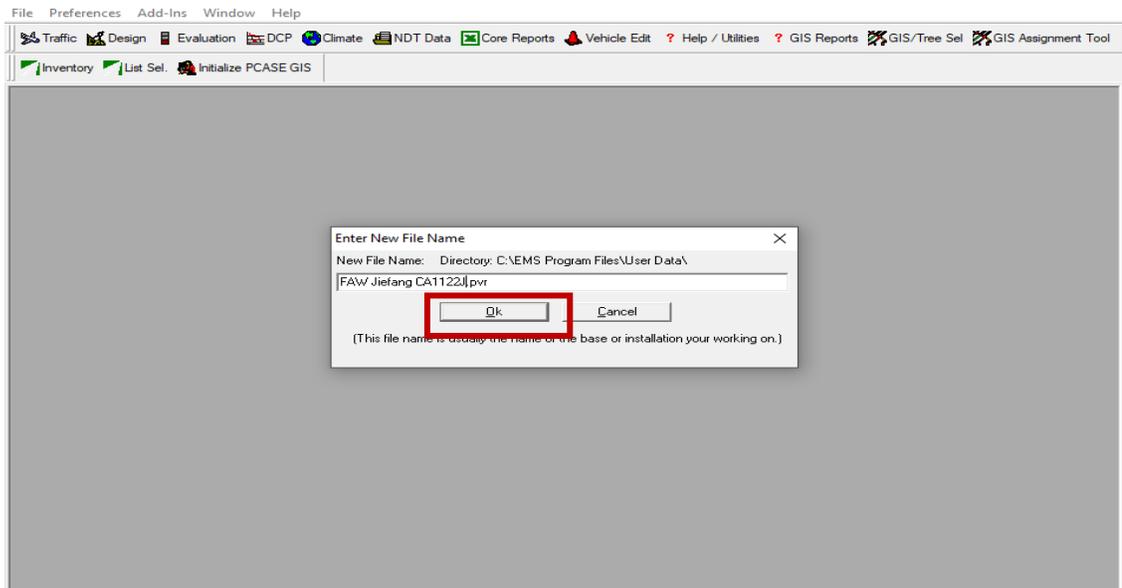
Figura 21. Creación del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Se lo denomina FAW Jiefang CA1122J.pvr

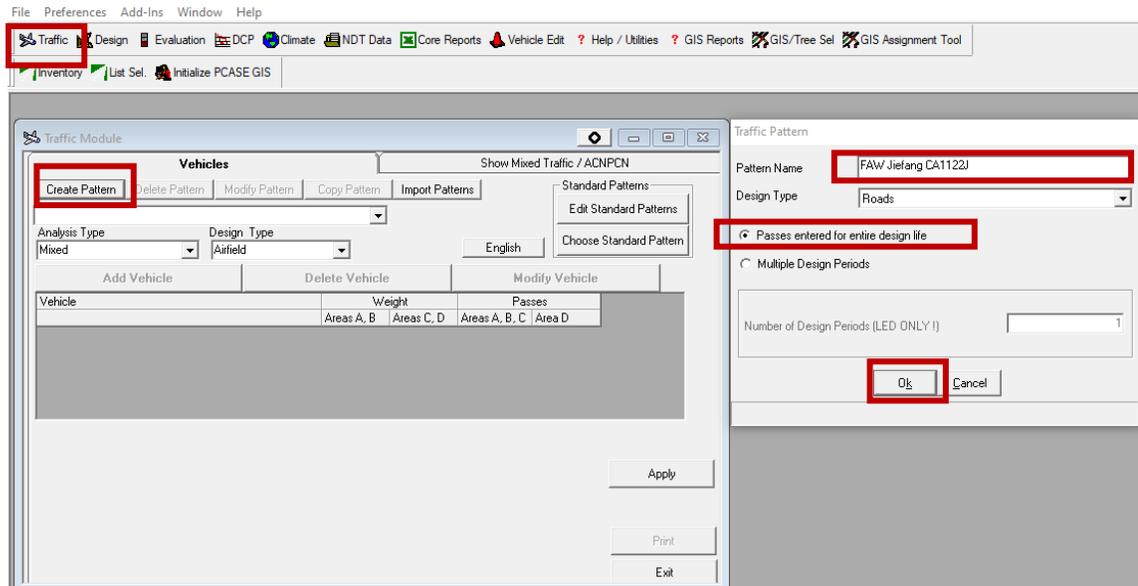
Figura 22, Asignación del nombre del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Se construye el modelo de tránsito

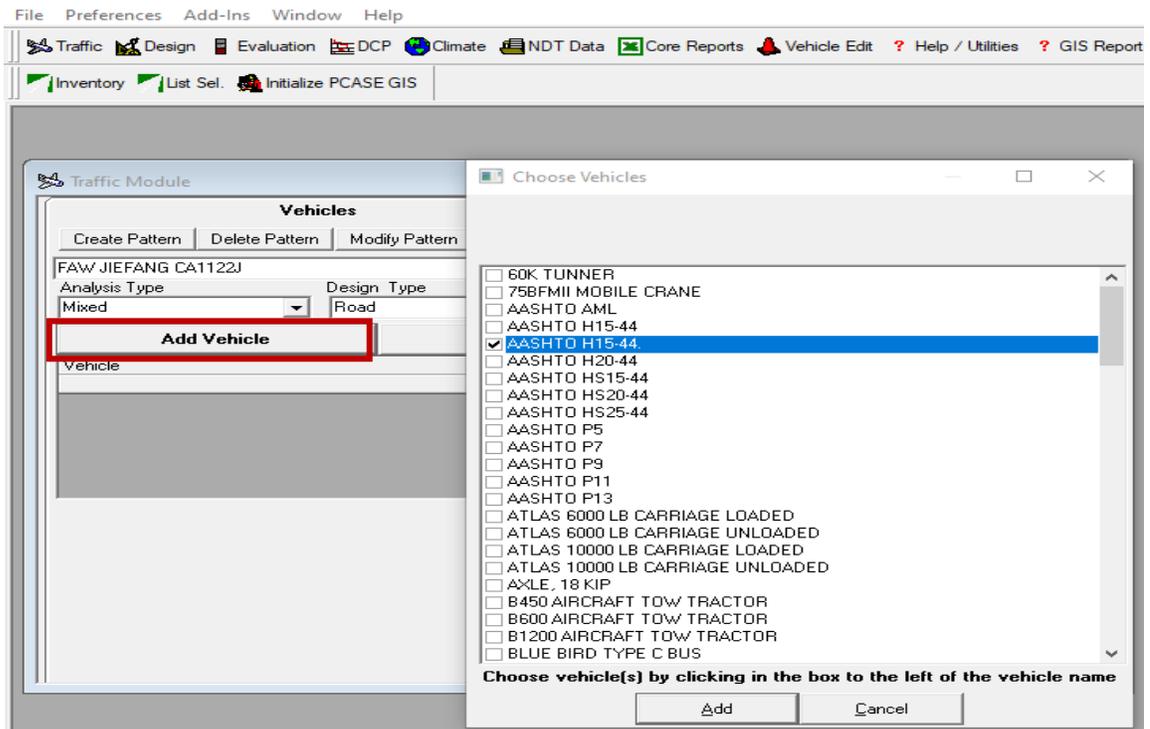
Figura 23. Construcción del modelo de tránsito



Fuente: Elaboración propia

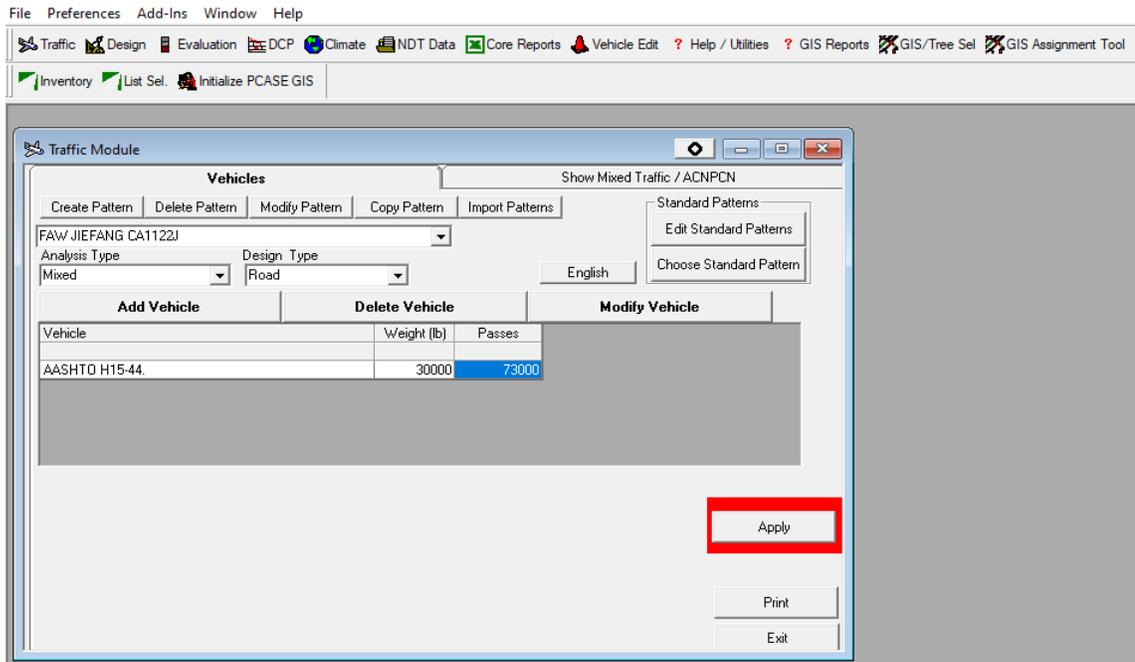
Se procede a seleccionar el vehículo de estudio e insertar las repeticiones de carga correspondientes.

Figura 24. Vehículo correspondiente FAW Jiefang CA1122J



Fuente: Elaboración propia

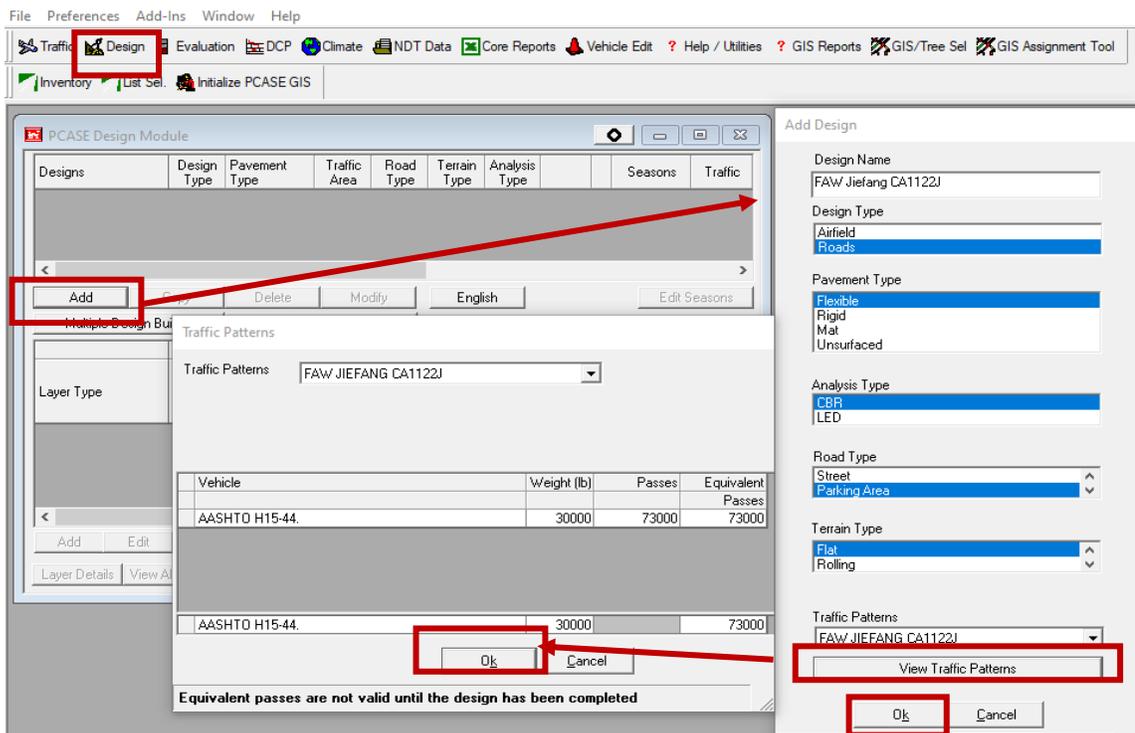
Figura 25. Vehículo correspondiente FAW Jiefang CA1122J



Fuente: Elaboración propia

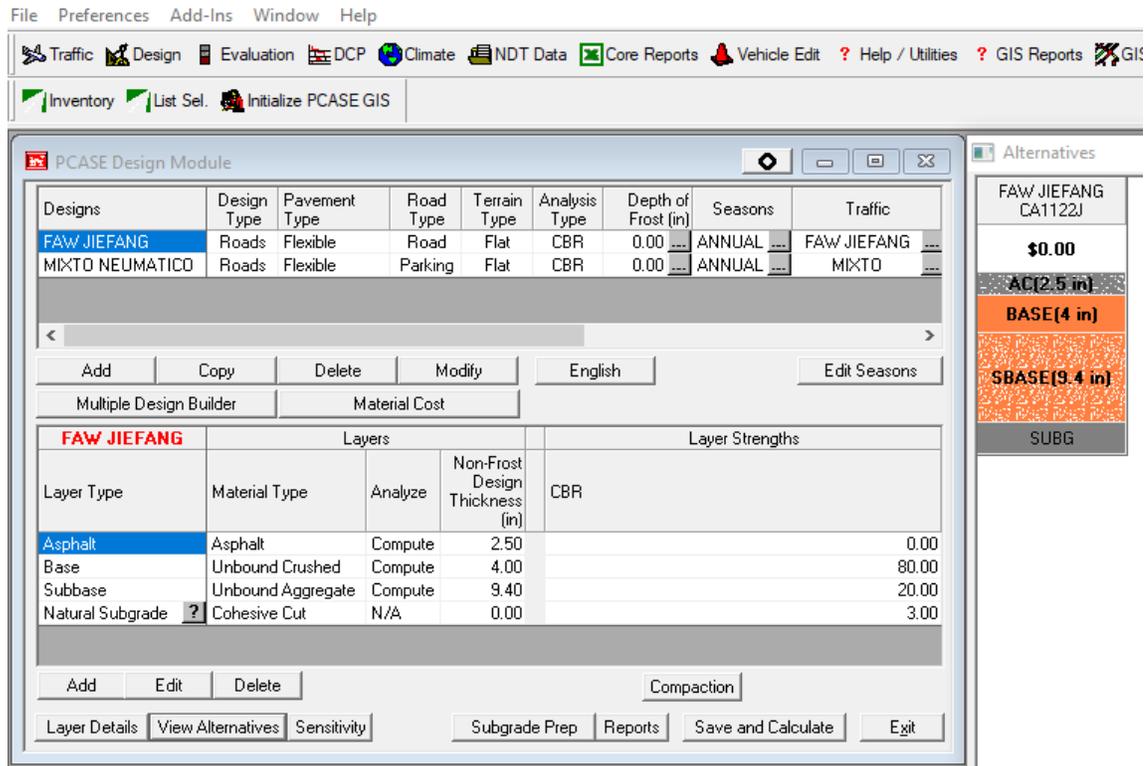
Se procede a adicionar las condiciones de diseño y se obtiene la siguiente estructura

Figura 26. Condición de diseño



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Resultado del diseño del vehículo FAW



Fuente: Elaboración propia

3.8. Vehículos militares de llanta a neumáticos y orugas

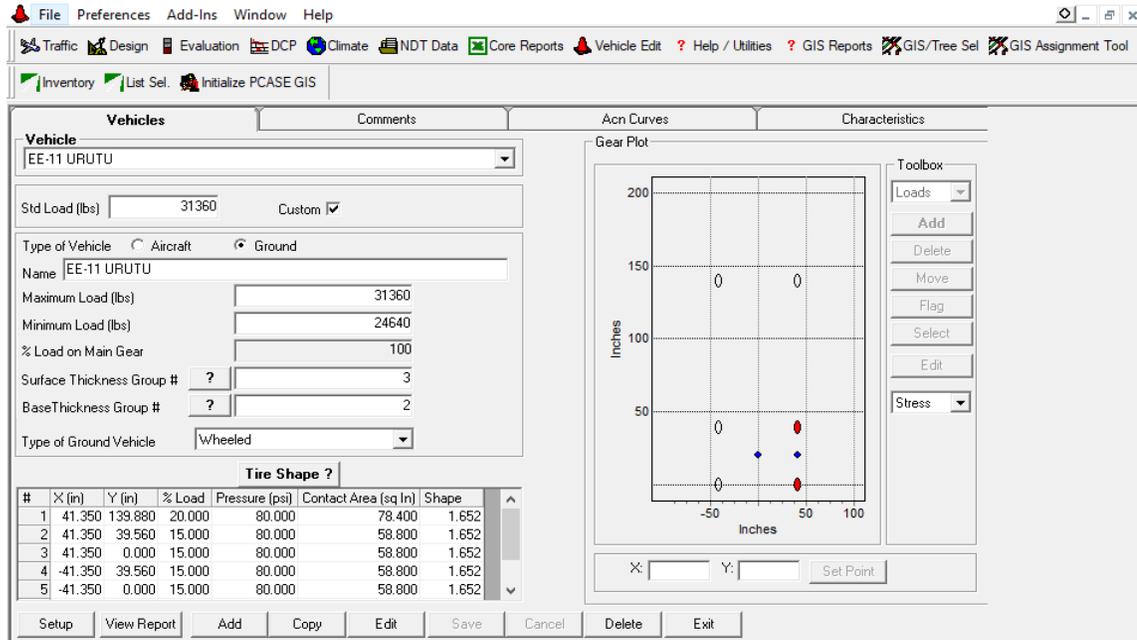
Se plantea como consideración el dimensionamiento para un hipotético caso que los vehículos militares blindados de La paz, lleguen al BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ, para alguna actividad militar correspondiente, el cual el tránsito de diseño está conformado por vehículos montados sobre orugas y llantas (Mixto).

Se consideran vehículos militares montados sobre llantas de neumáticos, considerados en el cálculo del tránsito y conformado por los siguientes vehículos, FAW Jiefang CA1122J, EE-11 URUTU y el tanque SK-105 KURASSIER.

Para este aparte se debió crear los vehículos mencionado con las características particulares de cada uno de ellos y se analizó para cada tipo de vehículo con forma de la llanta con el valor por defecto de forma (shape). Si los vehículos no están creados, se puede crear otro a partir de sus características o se puede editar un vehículo existente en la base de datos.

Creación vehículo EE-11 URUTU

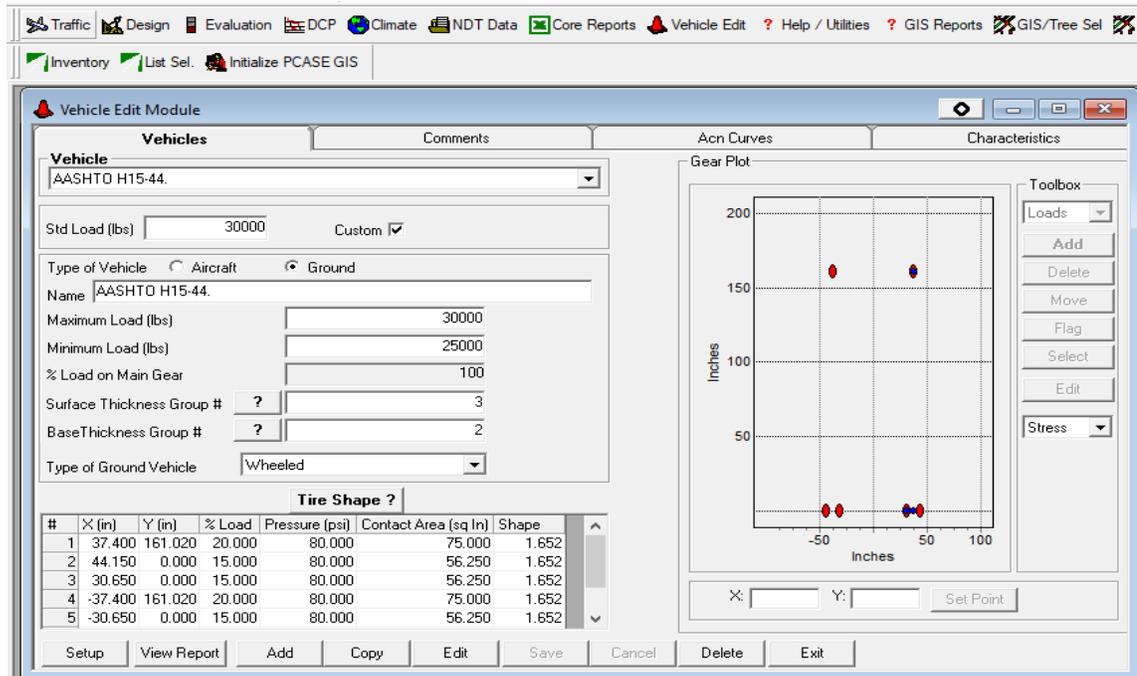
Figura 28. Características del vehículo militar EE-11 URUTU



Fuente: Elaboración propia

Creación vehículo tipo FAW Jiefang CA1122J

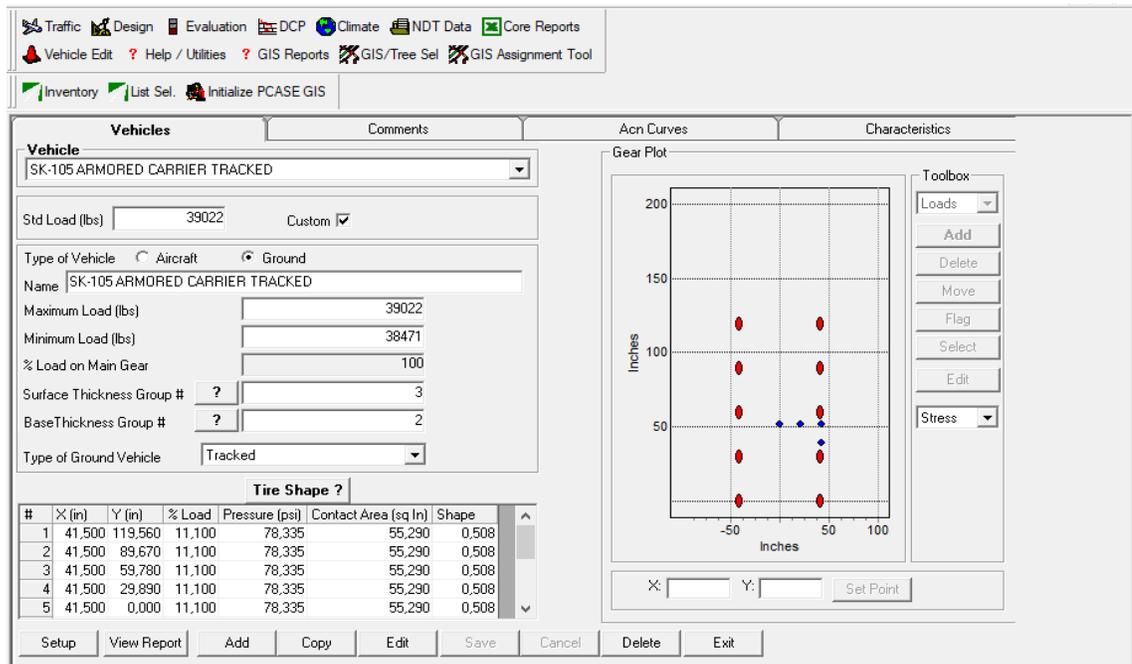
Figura 29. Características FAW Jiefang CA1122J corresponde a un vehículo AASHTO H15-44



Fuente: Elaboración propia

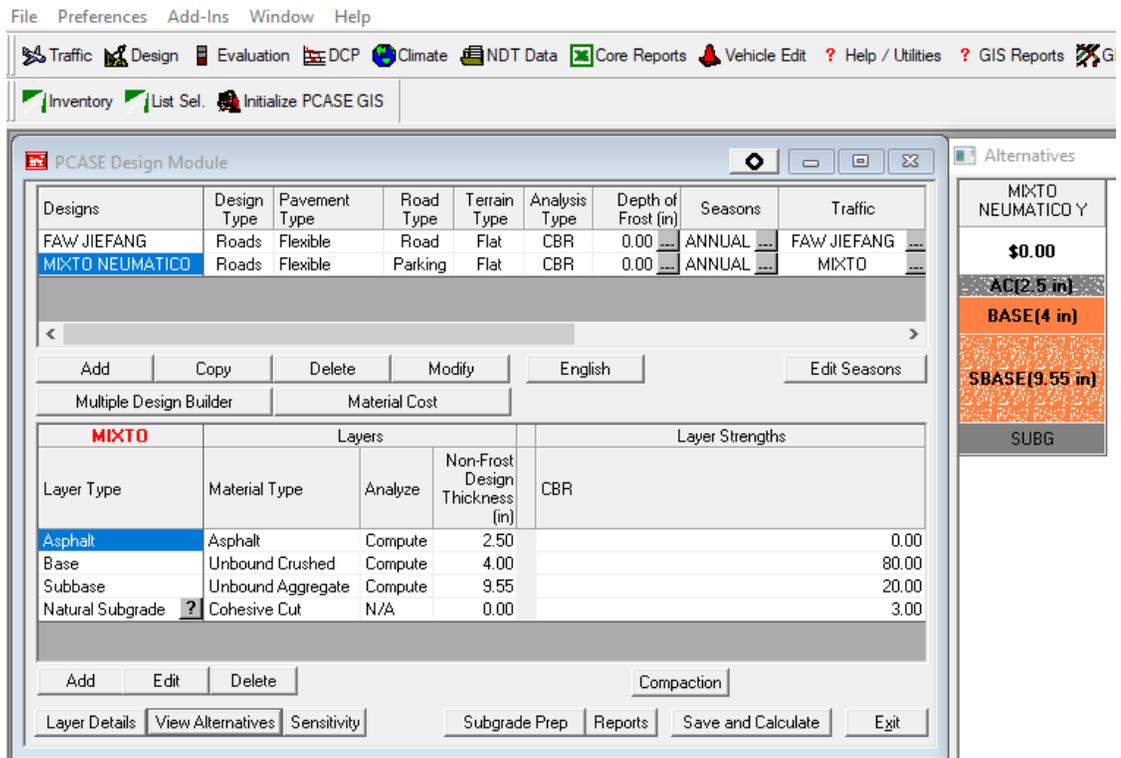
Creación vehículo SK-105 KURASSIER

Figura 30. Características del vehículo militar SK-105 KURASSIER



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Resultados de diseños de los vehículos militares



Fuente: Elaboración propia

3.9. Vehículos especializados de transporte (LOWBOY)

Se realiza el diseño para vehículo especializado de transporte ya que el desplazamiento de vehículos militares a orugas es de corta duración limitándose a desplazamiento administrativos internos y que no deben sobrepasar los 10 km., es decir son movimientos que se realizan dentro de sus propias instalaciones; para desplazamientos administrativos de distancias mayor a 10 km se los montan en sus transportadores, que son trailers orgánicos de las mismas unidades blindadas.

El vehículo de diseño del ejemplo es catalogado como equipo especializado el cual tiene la capacidad de llevar cargas excepcionales de gran peso en este caso la carga de un vehículo militar tipo orugas SK-105 KURASSIER.

Cálculo del tránsito equivalente 8,2 ton, para el vehículo militar montado sobre un LOWBOY.

El número de repeticiones del vehículo de diseño obtenido es de 55.000, el cálculo de este valor se presenta en el ANEXO B, así mismo el valor del factor de camión.

El número de ejes equivalentes de 8,2 ton se obtiene multiplicando el número de repeticiones por el factor de camión = $55.000 \times 1,23 = 67.650$ ESAL's (8,2 Ton).

Se determinarán los espesores para dos tipos de subrasante: Mr 4.500 psi, para un CBR de 3% y Mr 9.000 psi, para un CBR 6%.

Figura 33. Vehículo transporte especializado LOWBOY Mr 4.500

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: Flexible Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 80 % Zr = - 0.841 So = 0.45

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial = 4.2 PSI final = 2.0

Tránsito de diseño: W18 = 67650

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto			
1	435000	¿E/a?	0.440	1	¿m?	1.18	2.68	3.0	3.0	1.32
2	28000	¿E/a?	0.131	1	¿m?	1.65	2.52	3.0	4.0	0.52
3	13000	¿E/a?	0.093	1	¿m?	2.46	6.62	7.0	7.0	0.65
4	4500	MR							2.50	OK

W18 real: 7.42E+004

Cálculo de W18 para un SN: SN = W18 =

Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Vehículo transporte especializado LOWBOY Mr 9.000

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
 Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento: Flexible Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 80 % Zr = - 0.841 So = 0.45

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial = 4.2 PSI final = 2.0

Tránsito de diseño: W18 = 67650

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto			
1	435000	¿E/a?	0.440	1	¿m?	1.18	2.68	3.0	3.0	1.32
2	28000	¿E/a?	0.131	1	¿m?	1.65	2.52	3.0	4.0	0.52
3	13000	¿E/a?	0.093	1	¿m?	1.90	0.60	1.0	6.0	0.56
4	9000	MR							2.40	OK

W18 real: 2.91E+005

Cálculo de W18 para un SN: SN = W18 =

Fuente: Elaboración propia

3.10. Resultados y análisis

Presentamos los resultados obtenidos para el diseño de espesores de pavimentos asfálticos para vehículos militares destinados al uso en batallones.

3.10.1. Resumen de estructuras por los tres métodos

Se presenta los resultados obtenidos al efectuar el diseño por los tres métodos mencionados para el vehículo militar FAW Jiefang CA1122J del BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ”. para una carga tipo de un vehículo con llantas de neumático con 73.000 repeticiones de carga.

Tabla 30. Tránsito para las condiciones de análisis

Tipo de tránsito	Tipo de vehículo	Cargas	# Repeticiones calculadas	# Repeticiones adoptadas
Vehículo Militar	FAW Jiefang CA1122J	Una carga Tipo	73.000	73.000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Resultados para vehículos de neumáticos CBR 3%

AASHTO 93		Manual MS-23		PCASE	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	7,62	Carpeta asfáltica	31,12	Carpeta asfáltica	6,35
Base granular	10,16	Base granular		Base granular	10,16
Subbase	22,86	Subbase		Subbase	23,88
CBR subrasante	3%	CBR subrasante	3%	CBR subrasante	3%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Resultados para vehículos de neumáticos CBR 6%

AASHTO 93		Manual MS-23		PCASE	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	7,62	Carpeta asfáltica	26,87	Carpeta asfáltica	6,35
Base granular	10,16	Base granular		Base granular	10,16
Subbase	15,24	Subbase		Subbase	10,16
CBR subrasante	6%	CBR subrasante	6%	CBR subrasante	6%

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los espesores son similares entre el método tradicional AASHTO y el software de PCASE, donde la estructura se compone de una capa de asfalto, base y subbase granular, aunque no son iguales ya que en este último, la equivalencia utilizada se basa en el tráfico mixto. La comparación o equivalencia directa entre AASHTO y PCASE ESAL no es sencilla, ya que el cálculo de ESAL en cada metodología deriva de modelos, supuestos y procedimientos de diseño específicos. La conversión de cada vehículo a ESAL se basa en una investigación realizada por el U.S. Army Engineer Research and Development Center.

De acuerdo a los resultados del diseño de espesores obtenidos por el manual MS-23 y el software PCASE no son iguales debido a que el procedimiento presentado por el manual MS-23 se basan en una aplicación de la teoría elástica para diseño de pavimento que utiliza los resultados de investigaciones actualmente aceptables. Sin embargo, las interpretaciones de la investigación actual difieren y otros métodos de diseño basados en la teoría elástica pueden producir resultados diferentes, como es el caso del software PCASE el cual adopta un diseño elástico.

Las principal diferencia que existe entre los procedimiento mencionados anteriormente, es que, la metodología de diseño del MS-23, determina que todas las capas a construir por sobre la subrasante, deben ser asfálticas, y además debido a que el numero de repeticiones

del eje de carga esta ideada para ser muy inferior a las acostumbradas por ejemplo en una carretera, este método, es estrictamente para evaluar la carga de manera estática, no dinámica como lo promueven los diseños de carreteras, a si mismo el manual MS-23 utiliza para el diseño sus propias ecuaciones de transferencias para el cálculo de los espesores debido a las consideraciones de carga establecidos por este modelo y el software PCASE se basa en el modelo de diseño CBR Beta, el cual nos quiere decir que este procedimiento requiere que cada capa debe ser lo suficientemente gruesa para distribuir las tensiones inducidas por el tráfico, de modo que cuando las tensiones lleguen a la capa subrasante no sobrecarguen la capa causando una deformación por cizallamiento excesiva.

El cual podemos decir, de acuerdo a los resultados a través del manual MS-23, los espesores serán relativamente alto o bajos debido a sus consideraciones de carga, cuando sean bastantes elevados sus consideraciones de carga los resultados de los espesores serán altos, en este caso tenemos los resultados del vehículo militar tipo FAW Jiefang CA1122J el cual es un vehículo de uso de transporte de personal y su carga no es elevada como otros vehículos militares blindados.

3.10.2. Resultados para vehículos mixtos de llanta de neumáticos y oruga

Se presenta los resultados obtenidos al efectuar el diseño con el software PCASE, para una combinación de vehículos con llantas de neumático y orugas, para el hipotético caso que los vehículos militares blindados de La paz, lleguen al BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ, para alguna actividad militar.

Tabla 33. Tránsito para las condiciones de análisis

Tipo de tránsito	Tipo de vehículo	Cargas	# Repeticiones calculadas	# Repeticiones adoptadas
Vehículos Militares	FAW Jiefang CA1122J	Repeticiones de carga	73.000	73.000
	EE-11		54.750	55.000
	URUTU, SK-105		36.500	37.000
	KURASSIER			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Resultados de combinación de vehículos a orugas y neumáticos

PCASE		PCASE	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	6,35	Carpeta asfáltica	6.35
Base granular	10,16	Base granular	10,16
Subbase	24,26	Subbase	10,16
CBR subrasante	3 %	CBR subrasante	6%

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el diseño con el software PCASE, debido a que es una herramienta que permite evaluar las condiciones de carga más aproximada a la realidad el cual permite evaluar y sensibilizar el diseño de una estructura de pavimento flexible de forma ágil evaluando parámetros que en los otros métodos no se pueden tener en cuenta.

De acuerdo a los resultados podemos notar que las dimensiones aumentan debido al tipo de vehículo militar de diseño el cual podemos ver que se realizó el diseño para vehículos blindados el cual sus condiciones de carga son mucho más altas.

3.10.3. Resultados de vehículo especializado de transporte (LOWBOY)

Se presenta los resultados obtenidos al efectuar el diseño por el método tradicional AASHTO 93, LOWBOY montado por el vehículo militar a orugas SK-105 KURASSIER.

Tabla 35. Tránsito para las condiciones de análisis

Tipo de tránsito	Tipo de vehículo	Cargas	# Repeticiones calculadas	# Repeticiones adoptadas
Transporte especializado	LOWBOY	Repeticiones de carga	54.750	55.000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Resultado del LOWBOY cargado con vehículo a orugas SK-105 KURASSIER.

AASHTO 93		AASHTO 93	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	7,62	Carpeta asfáltica	7,62
Base granular	10,16	Base granular	10,16
Subbase	17,78	Subbase	15,24
CBR subrasante	3%	CBR subrasante	6%

Fuente: Elaboración propia

Se debe tener en cuenta que el documento UFC 3-250-01, PAVEMENT DESIGN FOR ROADS AND PARKING AREAS (2016), no sugiere el empleo de pavimento flexible para vehículos a orugas, por el daño que genera la oruga sobre el pavimento. El cual los vehículos militares a orugas solo pueden recorrer distancias administrativas no más de 10 km, y con protectores de tacos de goma para no poder realizar mucho daño al pavimento. Por tanto, se realizó el diseño de espesores para el Lowboy montado con el vehículo militar a orugas.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En función a los resultados expuestos en los capítulos anteriores, puede enunciarse las siguientes conclusiones:

- En el presente proyecto de investigación se pudo realizar satisfactoriamente el objetivo principal de analizar el dimensionamiento de pavimentos para la instalación militar, BAT. ING.-I “CNL. MÉNDEZ del ejército de Bolivia.
- Se presenta los procedimientos de diseño que sirve de guía para la persona que requiere efectuar un diseño de pavimento para una instalación militar del ejército de Bolivia, donde poseen en especial los vehículos militares blindados, en su mayoría son de transporte de personal y casi en su totalidad son de neumáticos.
- La variable del número de pasadas es de vital importancia, pues con él se tendrá la vida útil del proyecto, este valor es de difícil obtención, pues requiere de un estudio estadístico por parte de la instalación militar del ejército, sobre la utilización de sus distintos vehículos militares, esto fue lo más complicado de obtener en el estudio, lo cual se llegó a recurrir a estimaciones informales del régimen de tránsito.
- De acuerdo a los resultados de la tabla 31, podemos deducir por fines constructivos, la siguiente tabla, la cual propone el típico diseño de pavimento flexible que es recomendado para ser implementado.

AASHTO 93		Manual MS-23		PCASE	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	8,00	Carpeta asfáltica	32,00	Carpeta asfáltica	6,50
Base granular	10,50	Base granular		Base granular	10,50
Subbase	23,00	Subbase		Subbase	24,00
CBR subrasante	3%	CBR subrasante	3%	CBR subrasante	3%

Podemos observar que los espesores no son muy similares entre el método AASHTO y el software de PCASE, aunque no son iguales ya que en este último, la equivalencia utilizada se basa en el tráfico mixto y el modelo de diseño CBR Beta. La comparación o equivalencia directa entre AASHTO y PCASE ESAL no es sencilla, ya que el cálculo de ESAL en cada metodología deriva de modelos, supuestos y procedimientos de diseño específicos. La conversión de cada vehículo a ESAL se basa en una investigación realizada por el U.S. Army Engineer Research and Development Center (USACE, ERDC, siglas en inglés).

- En la metodología de diseño del MS-23, determina que todas las capas a construir por sobre la subrasante, deben ser asfálticas, y además debido a que el número de repeticiones del eje de carga esta ideada para ser muy inferior a las acostumbradas por ejemplo en una carretera, este método, es estrictamente para evaluar la carga de manera estática, no dinámica como lo promueven los diseños de carreteras.
- Los valores obtenidos por el Manual MS-23 son distintos debido a las consideraciones de carga elevadas en el modelo de este método. A si mismo con la disminución de las condiciones de subrasantes se obtiene mayores diferencias entre el manual MS-23, AASHTO 93 y el software de PCASE.
- A continuación, en la tabla se presenta el resumen del resultado del cálculo de la estructura mediante tráfico mixto de vehículos de llantas de neumáticos y orugas el cual el vehículo con mayor carga se convierte en el vehículo de control y los otros vehículos convertidos a él. Donde el vehículo de control fue el SK-105 KURASSIER, para nuestro tráfico mixto.

PCASE		PCASE	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	6,50	Carpeta asfáltica	6,50
Base granular	10,50	Base granular	10,50
Subbase	24,50	Subbase	10,50
CBR subrasante	3 %	CBR subrasante	6%

A, sí mismo podemos observar que al tener menores valores en nuestra subrasante los espesores de las capas de nuestras estructuras aumentan considerablemente. Existe evidencia considerable de que la resistencia de la subrasante de algunos pavimentos flexibles con capas bastante profundas de mezcla asfáltica, resultan ser más altas que la indicada por las pruebas de CBR saturado, en la realidad.

- En la siguiente tabla, podemos ver el resultado del diseño del vehículo de transporte especializado (Lowboy), montado por un vehículo a orugas, por el daño que este ocasiona ya que los vehículos militares a orugas solo pueden recorrer distancias administrativas no más de 10 km, y con protectores de tacos de goma para no poder realizar mucho daño al pavimento.

AASHTO 93		AASHTO 93	
Capa	Espesor (cm)	Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	8,00	Carpeta asfáltica	8,00
Base granular	10,50	Base granular	10,50
Subbase	18,00	Subbase	15,50
CBR subrasante	3%	CBR subrasante	6%

En la mayoría de los casos, las vías de acceso y de entrada pueden verse expuestas a las repeticiones de carga de varios miles de unidades de camiones con remolque cargadas por día y que pueden controlar el diseño, durante su vida útil por tal motivo se pudo verificar el diseño de pavimento por el método tradicional AASHTO 93, para evitar subestimar el daño que estos vehículos estándar de carreteras pudieran ejercer a la estructura diseñada.

- El análisis de resultados proporciona como conclusión que la calidad del material de la subrasante define los espesores del pavimento, donde la relación material de subrasante y espesor de las capas es la siguiente:

Menor Calidad de Subrasante. ➔ Mayores espesores de las capas superiores.

Mayor Calidad de Subrasante. ➔ Menores espesores de las capas superiores

4.2. Recomendaciones

Antes de finalizar, deseamos sugerir algunas recomendaciones en base a los resultados y las conclusiones a que se llegó luego del presente estudio:

- El software Pavimento PCASE es una herramienta que permite evaluar y sensibilizar una estructura de pavimento flexible y rígido para instalaciones militares del ejército de forma, ágil evaluando parámetros que en los otros métodos no se pueden tener en cuenta como son las condiciones de clima, se puede incluir la evaluación de subrasante por el Penetrómetro Dinámico de Cono, diseñar sobre carpetas introducir valores de FWD, determinar el daño acumulado del pavimento.
- Se sugiere que, para suelos arcillosos al menos, con capas freáticas profundas, el CBR de diseño se determine en base a los contenidos de agua de moldeo que producen alrededor del 85% de saturación. Tal enfoque en la mayoría de los casos dará como resultado valores de resistencia a nivel de subrasante más altos, pero mucho más realistas.
- El software Pavimento-Transporte Ingeniería estructural asistida por computadora PCASE, es el método que mejor se ajusta a las variables de diseño en una instalación militar del ejército, el cual es una herramienta que permite evaluar las condiciones de carga más aproximada a la realidad y que se adapta al tipo de vehículo militar en particular, pudiendo crear el elemento motriz que se requiera.
- Implementar recursos para la investigación y generación de Guías de Diseño empírico-mecanicistas propias de nuestro país, en el diseño de pavimentos en general, incluyendo cada tipología flexible, rígido y articulado, y sus diferentes variantes y/o combinaciones entre sí.